



Agrologística Para Productos Agrícolas Del Atlántico

Por: Jorge Mario Bolívar Redondo

Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

Énfasis: Ingeniería de Transporte

Director: PhD. Víctor Cantillo

Codirector: PhD. Pablo Miranda

Universidad del Norte

División de Ingenierías

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Barranquilla, Atlántico

Nota de aceptación

DEDICATORIA

“Para el que cree, todo es posible” – Marcos 9:23 (NVI)

A Dios. Un día lo soñé. Un día lo hiciste posible. Como tantas otras veces, has cumplido mis sueños, por fantasiosos que fuesen en su momento, hoy los cuento como historias. Nada es imposible para ti. Este logro es para ti, SEÑOR.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, gracias a Dios. Por abrir camino donde no lo había. Por disponer las personas, los recursos, los tiempos, y cada pequeño detalle para alcanzar este sueño. Sin tu ayuda, mi Dios, este sueño no habría sido posible.

A mi familia. Especialmente a mis padres. Por amor han decidido pagar un costo que no se mide en dinero, sino en tiempo, que es mucho más valioso. Su amor, su apoyo y su confianza han sido fundamentales para dedicarme de pleno a mis estudios. No tengo cómo agradecerles. Esto es para ustedes.

A Laura. Flaca, gracias porque en medio de dos años con altos, bajos, una pandemia y la distancia, has permanecido. Gracias por afirmarme, por apoyarme, por escucharme. Nuestra amistad es como el vino. Sobran las palabras, menos tres: te quiero muchísimo.

A Luis Felipe. Amigo, tu disposición a ayudar y actitud servicial son cualidades que más que *servir*, inspiran. Eres un gran tipo. Gracias por una amistad genuina todos estos años. Espero, sin duda, que sean muchos más.

A Mich. Tus palabras de sabiduría, de edificación, tus consejos y el amor que me has demostrado desde que somos amigos ha sido también de gran apoyo, no solo en estos dos años, sino desde que te conozco. Ser tu amigo es un tesoro.

A Mafé. Gracias, no solo por ser mi compañera, por ayudarme y explicarme, sino por recordarme que la vida también nos sorprende con cosas buenas, como buenos amigos, de forma inesperada.

A Vilma y Mac. Han sido unas muy buenas compañeras. Fue gratificante trabajar con ustedes. Sin embargo, me quedo más con la calidad de persona que son. Aprecio su apoyo en las clases que compartimos juntos, y en cada otro momento compartido.

A mis excelentes tutores. Víctor Cantillo, gracias por su constante disposición a ayudarme. Su vocación docente y altruismo me han sorprendido y han impactado mi vida. Solo las comparo con su capacidad y excelencia en cada cosa que hace. Pablo Miranda, gracias por su tiempo y dedicación pedagógica. Su agudeza ha sido indispensable para formular y resolver los problemas matemáticos acertadamente, y para enseñarme a “pensar fuera de la caja”. Mi experiencia durante el desarrollo de este trabajo no habría sido la misma sin ustedes.

Por último, a Julián Arellana, por ese correo comentándome sobre la oportunidad de una beca, que fue el inicio de esta aventura, y por supuesto, por una excelente clase de Modelos de Elección Discreta; y a César Henao, mil gracias por brindarme una de las mejores experiencias académicas que he tenido en mi vida, y por recordarme por qué me enamoré de la Ingeniería de Transporte, con su clase de Transporte Urbano. Ambos son docentes extraordinarios.

RESUMEN

Las cadenas de suministro de productos agrícolas tienen características que las diferencian de otras cadenas de abastecimiento. La volatilidad de los precios, incertidumbre en la oferta y demanda y, especialmente, el manejo de productos perecederos representa un reto logístico monumental. Anualmente, millones de toneladas de productos agrícolas (como frutas y verduras) son desperdiciados, en Colombia y en el mundo, debido a deficiencias en distintos eslabones de la cadena logística, como la producción, transporte y almacenamiento.

El diseño de las cadenas de suministro es un proceso altamente complejo. Tradicionalmente, el proceso de toma de decisiones se ha hecho secuencialmente. Sin embargo, en las últimas décadas se ha resaltado la ventaja de la toma de decisiones conjuntas por medio de modelos que permiten la toma de decisiones simultáneamente, vinculando decisiones estratégicas, tácticas y operacionales. La literatura enfocada al diseño de cadenas de suministro para productos agrícolas perecederos es relativamente escasa. La modelación de la *perecibilidad* es un desafío en este sentido, ya que es un proceso sumamente complejo, dependiente del tipo de producto, factores biológicos, y especialmente, factores ambientales como la humedad y la temperatura.

El principal objetivo de esta investigación es proponer un modelo matemático para el diseño de la cadena de suministro de productos agrícolas perecederos en un marco de toma de decisiones estratégicas y táctico – operacionales. La inclusión de multi – dimensionalidad en la modelación, restricciones de capacidad y producción, sensibilidad de los precios respecto a la calidad, y posibilidad de elegir instalaciones con diferente impacto sobre la perecibilidad, simultáneamente, surge como una novedad aportada por el modelo propuesto.

Para tal propósito, se propuso un modelo entero mixto no – lineal y luego, se propuso una reformulación de modo que se eliminaran las no – linealidades del problema, extendiendo además el modelo para lograr mayor generalidad y permitir potenciales aplicaciones a otros contextos.

El documento parte describiendo la definición del problema, objetivos y contribuciones de la investigación. Luego, se realiza una caracterización del entorno en el cual se aplicó el modelo. Seguidamente, se realiza una revisión de la literatura relacionada al diseño de cadenas de suministro agrícolas. Se describe el problema, suposiciones, y se procede a la formulación del modelo matemático, junto con la linealización planteada. La sección siguiente aborda las suposiciones específicas y fuentes de información para el caso de implementación.

Los resultados sugieren que la inclusión de la perecibilidad en el diseño de cadenas de suministro puede tener un impacto notorio en decisiones estratégicas sobre el diseño de la red, en las estimaciones de los ingresos de la cadena, y en las relaciones inventario – capacidad. Además, se encontró que la elección de instalaciones *refrigeradas* efectivamente representa una mejora en el beneficio percibido en la cadena por sobre las instalaciones *regulares*.

Se espera que los resultados sean útiles para los tomadores de decisiones y autoridades del departamento del Atlántico, donde se desarrolló el caso de aplicación. Igualmente, se espera que los resultados contribuyan a acortar la brecha investigativa en el área abordada.

ABSTRACT

Agricultural supply chains have characteristics that differentiate them from others. Price volatility, uncertainty in supply and demand, and the handling of perishable products represent a monumental logistical challenge. Every year, millions of tons of agricultural products (such as fruits and vegetables) are wasted in Colombia and around the world due to deficiencies in different logistics chain stages, such as production, transport, and storage.

The design of supply chains is a highly complex process. Traditionally, the decision-making process has been done sequentially. However, in recent decades the advantage of joint decision-making has been highlighted by means of models that allow decisions to be made simultaneously, linking strategic, tactical, and operational decisions. The literature focused on the design of supply chains for perishable agricultural products is relatively scarce. Modeling perishability is a challenge in this regard, as it is a highly complex process, depending on the type of product, biological factors, and especially environmental factors such as humidity and temperature.

The main objective of this research is to propose a mathematical model for the design of the supply chain of perishable agricultural products within a strategic and tactical-operational decision-making framework. The inclusion of multi-dimensionality in the modeling, capacity and production constraints, price sensitivity with respect to quality, and the possibility of choosing facilities with different impact on perishability, simultaneously emerges as a novelty provided by the proposed model.

For this purpose, a mixed non-linear integer model was proposed, and then, a reformulation was proposed to eliminate the nonlinearity of the problem, also extending the model to achieve greater generality and allow potential extensions to other contexts.

This document starts by describing the problem definition, objectives, and contributions of the research. Then, a characterization of the environment in which the model was applied is made. This is followed by a review of the literature on agricultural supply chain design. The problem is described, assumptions are made, and the mathematical model is then formulated, along with the linearization proposed. The following section addresses the specific assumptions and sources of information for the case of implementation.

The results suggest that the inclusion of perishability in the design of supply chains can significantly impact strategic decisions on network design, on estimates of chain income, and inventory/capacity relationships. In addition, it was found that the choice of refrigerated facilities effectively represents an improvement in the perceived revenue in the chain over regular facilities.

It is hoped that the results will be useful to decision-makers and authorities in the Department of Atlántico, where the application case was developed. Likewise, it is expected that the results will contribute to shortening the research gap in the area addressed

Contenido

1	Introducción	1
1.1	Definición del problema.....	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Contribuciones	4
1.4	Estructura del documento.....	4
2	Caracterización del sector agrícola	6
2.1	Aspectos económicos	6
2.2	Exportaciones	9
2.3	Producción agrícola.....	12
2.4	Aspectos logísticos.....	16
3	Diseño de cadena de suministro agrícola. Revisión de la literatura.....	19
4	Metodología	23
4.1	Contexto de modelación.....	23
4.1	Formulación del modelo.....	26
4.2	Reformulación – Linealización del problema	28
4.2.1	Asignación de proveedores y clientes	29
4.2.2	Precios	29
4.2.2	Costos de inventario.....	31
4.2.3	Compras y Ventas	31
4.2.4	Inventario y demás restricciones.....	32
5	Caso de aplicación.....	34
5.1	Oferta.....	35
5.2	Demanda.....	37
5.3	Costos de transporte	37
5.4	Precio de venta y costos de inventario	38
5.5	Capacidad de las instalaciones y costos de arriendo.....	41
5.6	Costos de producción	42
5.7	Escenarios de modelación	42
6	Resultados y Discusión	44
6.1	El máximo beneficio: función objetivo.....	44
6.2	Costos globales.....	45

6.3	Configuración de la red	47
6.4	Costos de inventario vs depreciación de los productos.....	50
6.5	Número de instalaciones vs tarifa de transporte.....	53
6.6	Modelos Benchmark	54
6.6.1	Modelo Benchmark 1	54
6.6.2	Modelo Benchmark 2	57
7	Recomendaciones.....	60
7.1	Caso de pérdida de productos.....	60
7.2	Consideración del problema de distribución o ruteo de vehículos.....	61
7.3	Estrategias de dinamización del mercado	63
8	Conclusiones	64
	Apéndice A.	66
	Referencias	72

Lista de figuras

Figura 2-1 Variación del PIB departamental y del porcentaje del PIB de actividades agrícolas.....	7
Figura 2-2 Comparación PIB departamental y PIB producto de actividades agrícolas	7
Figura 2-3 Comparación entre el número de empresas y número de empleados en el sector agrícola.....	8
Figura 2-4 Salario promedio para trabajadores del sector agrícola en el Atlántico....	9
Figura 2-5 Valor promedio de exportación de verduras y hortalizas por subregión	10
Figura 2-6 Valor promedio de exportación de frutas por subregión	11
Figura 2-7 Valor promedio de exportación de cereales por subregión.....	11
Figura 2-8 Distribución de producción por producto priorizado por municipio	13
Figura 2-9 Rendimiento de producto priorizado por municipio	14
Figura 2-10 Porcentaje de participación del grupo de alimentos sobre la producción agrícola total del municipio	15
Figura 2-11 Distribución de unidades de producción agrícola según su extensión..	16
Figura 2-12 Pérdida de alimentos por regiones	17
Figura 4-1 Diagrama genérico de la red propuesta.....	23
Figura 4-2 Discretización de precios acorde al tipo de bodega. Ejemplo de precio medio para guayaba común.	30
Figura 5-1 Proveedores de la red	36
Figura 5-2 Precios no lineales para frutas, bodega refrigerada. Caso de aplicación.	40
Figura 5-3 Precios lineales para frutas, bodega regular. Caso de aplicación.	41

Figura 6-1 Escenarios con función objetivo más alta	44
Figura 6-2 Distribución de costos globales promedio - con costos de producción ..	45
Figura 6-3 Distribución de costos globales promedio - sin costos de producción ...	46
Figura 6-4 Configuraciones frecuentes de la red – ejemplo 1	48
Figura 6-5 Configuraciones frecuentes de la red – ejemplo 2	49
Figura 6-6 Efecto de la depreciación sobre los niveles de inventario a través del tiempo	51
Figura 6-7 Efecto de la depreciación sobre los niveles de inventario a través del tiempo - escenarios con oferta parcialmente disponible.....	52
Figura 6-8 Niveles de inventario en el modelo Benchmark 1	55
Figura 6-9 Corrección en el precio de venta de productos del modelo Benchmark ..	56
Figura 6-10 Comparación de niveles de inventario - Modelo Benchmark 2, escenario 44 y escenario 60	58

Lista de tablas

Tabla 2-1 Indicadores de producción promedio (2008-2017) para el departamento por productos priorizados	12
Tabla 2-2 Clasificación de alimentos en grupos	14
Tabla 4-1 Restricciones de la formulación inicial	27
Tabla 4-2 Parámetros y variables añadidos en la reformulación del problema	28
Tabla 4-3 Nuevas restricciones de asignación y localización.....	29
Tabla 4-4 Esquema del nuevo parámetro de precios <i>Vpkr</i>	30
Tabla 4-5 Restricciones sobre pedidos a proveedores	31
Tabla 4-6 Restricción de activación para ventas a clientes	31
Tabla 4-7 Otras restricciones de la reformulación del modelo	32
Tabla 5-1 Restricciones del caso de aplicación	35
Tabla 5-2 Consumo de frutas (g/día) para algunas de los puntos de demanda.....	37
Tabla 5-3 Precio medio (\$/Ton) por categoría de producto, acorde al tipo de bodega	38
Tabla 5-4 Costos de inventario (\$/Ton/día) para el caso de aplicación.....	38
Tabla 5-5 Precios no lineales para frutas. Caso de aplicación.....	39
Tabla 5-6 Precios lineales para frutas. Caso de aplicación.....	40
Tabla 5-7 Costos de arriendo de bodegas	42
Tabla 5-8 Costos de producción por tonelada	42
Tabla 5-9 Factores considerados para los escenarios de modelación	43
Tabla 6-1 Impacto de depreciación sobre los costos de inventario	50
Tabla 6-2 Efecto de la tarifa de transporte en el número de instalaciones	53
Tabla 6-3 Efecto de la tarifa de transporte en el número de instalaciones - caso de oferta parcialmente disponible.....	53
Tabla 6-4 Comparación de resultados - Modelo Benchmark 1	54
Tabla 6-5 Comparación de resultados - Modelo Benchmark 2	57

Tabla 7-1 Notación adicional en el modelo matemático para el caso de pérdida de productos	60
Tabla I-1 Relación de escenarios de modelación y parámetros – parte 1	66
Tabla I-2 Relación de escenarios de modelación y parámetros – parte 2	67
Tabla I-3 Relación de escenarios de modelación y parámetros – parte 3	68
Tabla 1-4 Relación escenarios de modelación, tamaño del problema y tiempo de solución – parte 1	69
Tabla 1-5 Relación escenarios de modelación, tamaño del problema y tiempo de solución – parte 2	70
Tabla 1-6 Relación escenarios de modelación, tamaño del problema y tiempo de solución – parte 3	71

1 Introducción

La logística es un factor crucial en la competitividad y el desarrollo económico de una región (BID, 2011). Aunque el país presenta mejoras en los índices de desempeño logístico (Departamento Nacional de Planeación, 2019), existen condiciones que hacen que en ocasiones sea más económico realizar una exportación que una operación de comercio nacional¹. Infortunadamente, Colombia presenta diferentes dificultades en este ámbito que han afectado el desempeño de los sectores económicos. Según el Ministerio de Transporte (2019) existen problemáticas relacionadas con corredores logísticos carentes de infraestructura apropiada, deficiencias en la operación portuaria, debilidad técnica en el sector transporte, y dispersión de los sistemas de información, entre otras.

De acuerdo con la Encuesta Nacional Logística (Departamento Nacional de Planeación, 2018), el costo logístico promedio entre los diferentes sectores económicos es de 13,5%. Específicamente, el costo para el sector agropecuario es de aproximadamente el 12,8%. Los costos logísticos tienen un impacto particularmente importante en el sector agropecuario donde en general, la tecnificación y la infraestructura están desarrolladas escasamente (Gebresenbet & Bosona, 2012). El alto costo logístico es uno de los principales factores que impide a los productores agrícolas, en particular a los pequeños y medianos, ser competitivos en el mercado (Nordmark et al., 2012). Es importante mencionar que, en las zonas rurales, los altos costos y riesgos del transporte se ven exacerbados por el mal estado de la malla vial, la ineficiencia de la red y los servicios de infraestructura de transporte (Chakwizira et al., 2010).

Considerando las condiciones del país en lo referente, el gobierno ha determinado hacer de la logística un pilar en el desarrollo económico, para lo cual ha estipulado un plan de desarrollo en el área – Política Nacional Logística (Departamento Nacional de Planeación, 2020a)– y ha realizado inversiones en infraestructura, gestión de alianzas, y consultorías (MINTRANSPORTE, 2019), considerando el potencial económico de cada región.

El departamento del Atlántico ha visto transformaciones asociadas con esta iniciativa de gobierno en el corto y mediano plazo; algunos ejemplos son la construcción de la doble calzada en la ruta 90 así como la construcción de otras variantes que conectan los municipios y las rutas nacionales que cruzan el territorio como acciones para incrementar la conectividad entre las localidades. Asimismo, ha apostado al desarrollo logístico apoyando distintas áreas, desde la intención de posicionar al Atlántico como un departamento estratégico en el transporte de carga mediante el mejoramiento de la conectividad vial en sectores de difícil acceso (vías terciarias), pasando por la inversión en formación de capital humano con enfoque investigativo (Gobernación del Atlántico, 2020), hasta iniciativas que involucran conjuntamente la academia, el gobierno y el sector empresarial como “Logport” (Paternina Arboleda, 2013), enfocada hacia la creación de una plataforma de organización de información de proveedores, operadores, agencias y otros actores que intervienen en la

¹ Ver <https://revistadelogistica.com/actualidad/gestion-de-contenedores-un-reto-en-contravia/>

cadena logística. No obstante, existen retos importantes en términos del mejoramiento de la eficiencia logística que deben afrontarse, teniendo en cuenta las características de las diferentes cadenas acorde a los sectores económicos más fuertes: la metalurgia, producción de cemento y el sector agrícola.

1.1 Definición del problema

Características de los productos alimenticios como la limitada vida de almacenamiento y la consecuente pérdida de calidad en el tiempo, los requerimientos con respecto a la humedad y temperatura, los posibles efectos de interacción entre productos, los plazos de entrega de productos, las expectativas de los consumidores y los márgenes de ganancia constituyen retos para la gestión de la cadena de productos alimenticios (Akkerman et al., 2010). El carácter perecedero de los productos alimenticios afecta significativamente los costos de la cadena de suministro al imponer nuevos requerimientos en producción, almacenamiento y transporte (Wunderlich & Martinez, 2018).

Anualmente, 1.300 millones de toneladas de comida son desperdiciadas en el mundo debido a diversas causas y desafíos (Gustavsson et al., 2011). En la cadena de alimentos agrícolas se genera pérdida y desperdicio de alimentos (Lemaire & Limbourg, 2019), y cada etapa de ella contribuye a este proceso (Priefer et al., 2016). Algunos factores que pueden crear pérdida y desperdicio de alimentos independientemente de la etapa de la cadena son la variabilidad natural de los productos alimenticios y la infraestructura y logística deficiente (FAO, 2013; Mena et al., 2014).

Para enviar alimentos perecederos de forma eficiente de zonas de producción rurales a los consumidores, mayormente ubicados en las zonas urbanas, y evitar pérdidas en la calidad de los alimentos, la gestión de la cadena de suministro se ha convertido en un concepto importante en la industria de comida fresca (Jedermann et al., 2014; Parfitt et al., 2010). La gestión de la cadena de abastecimiento coordina y controla procesos y tareas logísticas de los varios actores para entregar productos en tiempo y precios competitivos (Long & Zhang, 2014; Van Der Vorst et al., 2009).

El departamento del Atlántico carece de una estructura logística que le permita incluir cadenas de frío, facilitar el manejo, reducir las pérdidas y preservar la calidad de los productos para los pequeños productores (Gobernación del Atlántico, 2016). El Atlántico cuenta con pocas instalaciones para el abastecimiento de productos agrícolas. El Ministerio de Agricultura (MINAGRICULTURA) menciona los principales centros de acopio de producto y algunas de las dificultades a las que se enfrenta el departamento en este rubro (2019b, p. 41): en el caso de la Gran Central de Abastos del Caribe (GRANABASTOS), las instalaciones no siempre tienen condiciones apropiadas para el saneamiento, higiene y seguridad en el manejo de productos perecederos, así como de un área suficiente para los productos agropecuarios; por otra parte, el otro gran centro en el que confluyen productos agrícolas del departamento y la región Caribe es el Mercado de Barranquillita, ubicado en la capital del Atlántico. A excepción del municipio de Sabanalarga, fuera del Área Metropolitana de Barranquilla no existen plazas de mercado que permitan la

comercialización minorista de productores agropecuarios. (MINAGRICULTURA, 2019b, p. 41)

Ante la insuficiencia de centros de almacenamiento adecuadas para este propósito, es importante considerar que las instalaciones son costosas de construir y su ubicación es difícil de modificar. Además, la dificultad de predecir los costos de producción, transporte e inventario hacen que exista un importante grado de incertidumbre al momento de la toma de decisiones relacionadas a la localización de instalaciones, haciéndolas altamente complejas (Daskin et al., 2003). Estas decisiones son un aspecto crítico del funcionamiento eficiente de una cadena de suministro. Una localización inadecuada llevará a costos excesivos que se verán reflejados a lo largo de la vida de operación de las instalaciones (Meng et al., 2009). Las decisiones tomadas en torno a la gestión de la cadena de suministro también comprenden la solución de problemas de ruteo de vehículos, de asignación y de inventario. Tradicionalmente estos problemas han sido resueltos independientemente. No obstante, tales enfoques pueden producir soluciones óptimas a nivel local que minimicen los costos para cada problema (e.g., localización de instalaciones) de forma aislada, sin que necesariamente se produzca un óptimo global (Farahani et al., 2015). Firoozi et al., (2014) encontraron que el ahorro en costos obtenido por medio de un enfoque integrado de decisiones de instalación e inventario incrementaba en la medida que la vida de los productos disminuía, concluyendo que entre más perecedero sea un producto, más recomendable es el enfoque integrado. Por otra parte, la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos tendría un impacto positivo en la economía (ingresos de los productores, gastos de los consumidores) (Lipinski et al., 2016), la seguridad alimentaria (Ingram et al., 2013), la lucha contra el hambre (Garrone et al., 2014) y la huella ecológica mundial (Eriksson et al., 2014).

Los argumentos anteriormente expuestos permiten asegurar que el mejoramiento de las condiciones de la cadena de abastecimiento para alimentos agrícolas en el Atlántico constituye un área con potencial para investigación, en aras de proporcionar condiciones de operación más favorables a nivel logístico y reducir el impacto generado por el manejo inapropiado y la falta de tecnificación existentes. Considerando el potencial agrícola del departamento, la problemática en temas logísticos y agrícolas que concierne directamente los intereses gubernamentales, la posibilidad de impulsar la economía local y regional a través de esta actividad, la presente propuesta de investigación busca diseñar un modelo logístico estratégico – táctico para la localización de instalaciones y el control de inventario de la cadena de suministro de productos (alimentos) agrícolas del Atlántico que permita añadir valor a los productos y posicionar favorablemente a los productores en el mercado, repercutiendo en beneficios sociales y económicos para los productores, habitantes y el gobierno del Atlántico. Es menester precisar que el presente trabajo se enfoca únicamente en productos agrícolas diferentes a la ganadería y pesca.

1.2 Objetivos

En la presente investigación se busca diseñar un modelo logístico estratégico – táctico para la localización de instalaciones y el control de inventario de la cadena de suministro de

productos (alimentos) agrícolas del Atlántico que permita añadir valor a los productos y posicionar favorablemente a los productores en el mercado, repercutiendo en beneficios sociales y económicos para los productores, habitantes y el gobierno del Atlántico

- Analizar alternativas de localización de instalaciones que proporcionen una ubicación estratégica para las actividades relacionadas a la cadena de abastecimiento (recepción, almacenamiento y distribución de la carga).
- Formular un modelo matemático que seleccione las instalaciones apropiadas (refrigeradas o convencionales) y los niveles de inventario tal que se satisfaga la demanda de los productos y se maximice el beneficio percibido en la cadena.
- Proponer estrategias de comercialización que dinamicen el mercado.

1.3 Contribuciones

La investigación desarrollada realiza las siguientes contribuciones: desde un punto de vista metodológico, se destaca la formulación de un modelo de producción – localización – inventario, multi – período y multi – producto para productos agrícolas perecederos. El modelo considera distintos tipos de instalaciones (bodegas regulares – es decir, bodegas no refrigeradas –, bodegas refrigeradas) las cuales presentan distintos costos para la cadena de suministro, así como distintos niveles de impacto sobre la tasa deterioro de los productos. Hasta donde sé, no existe en la literatura un modelo con tales características en el contexto analizado. Además, se presenta una aplicación del modelo formulado a un caso real, en el departamento del Atlántico, Colombia. No obstante, los aspectos específicos del caso de aplicación, el modelo formulado cuenta con la generalidad suficiente para ser aplicado a otro contexto con distintas características geográficas, más productos, mayores niveles de producción, etcétera.

Por otra parte, se propone una estrategia asociativa entre los pequeños productores agrícolas del departamento en lo referente a la consolidación de la carga (productos), lo cual les permite alcanzar economías de escala y disminuir costos logísticos. Además, el diseño de una cadena de suministro para pequeños productores agrícolas del departamento, lo cual elimina los intermediarios y maximiza el beneficio percibido por los productores debido a mayor rentabilidad por la venta de sus productos.

1.4 Estructura del documento

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: inicialmente se realiza una caracterización del sector agrícola en el contexto de estudio. Este primer capítulo incluye aspectos relacionados con la participación del sector en los indicadores económicos, las exportaciones desde el sector, niveles de producción y los aspectos logísticos más relevantes. Una revisión de la literatura relacionada al diseño de cadenas de suministro en el sector de agro – alimentos es presentada en el capítulo 3. Las consideraciones metodológicas y la presentación de un modelo general, así como su reformulación se encuentran en el capítulo 4. El capítulo 5 presenta las consideraciones específicas del caso de aplicación al

departamento del Atlántico. Los resultados de modelación son expuestos y discutidos en el capítulo 6. Algunas extensiones hacia temas de investigación afines y una propuesta de dinamización del mercado son presentadas en la sección 7. Finalmente, las conclusiones, limitaciones y futuras líneas de investigación son expresadas en el capítulo 8.

2 Caracterización del sector agrícola

Colombia ha sido un país con tradición y vocación agrícola. La nación cuenta con 4,8 millones de hectáreas cultivables sembradas (FINAGRO, 2018). Acorde al Censo Nacional Agropecuario (2015), del total del área para uso agrícola, aproximadamente el 80% se utilizó para cultivos, fracción de la cual el 74,8% correspondió a cultivos permanentes. Este sector de la economía realiza importantes aportes al PIB nacional – superior al 7% (Romero Álvarez, 2011) – y aun cuenta con capacidad de expansión (FINAGRO, 2014). A su vez, el departamento del Atlántico cuenta con potencial en el sector, dado que más del 50% de sus tierras son arables (IGAC, 2016).

2.1 Aspectos económicos

El departamento del Atlántico tiene frentes de desarrollo económico en establecimientos financieros, inmobiliarios, servicios a empresas e industria manufacturera principalmente. El aporte del Producto Interno Bruto (PIB) del sector agrícola es pequeño en comparación con los sectores anteriormente mencionados (ver Figura 2-1). No obstante, desde el gobierno departamental las inversiones para la mejora del sector agropecuario se han convertido en un objetivo, como puede evidenciarse en los Planes de Desarrollo de la administración del período 2016 – 2019 y el de la administración vigente: para la administración anterior, el sector agropecuario era “de gran potencial para el desarrollo a largo plazo. De hecho, es clasificado como la base del progreso económico, social y ambiental del departamento, una gran apuesta que permitiría mejorar las oportunidades y calidad de vida de los productores rurales, impulsando el desarrollo departamental” (MINAGRICULTURA, 2019b, p. 22). Por su parte, la administración vigente pretende hacer del departamento una potencia en la producción alimentaria mediante el desarrollo sólido del sector agropecuario (Gobernación del Atlántico, 2020). Además, el sector ha mostrado un crecimiento en consonancia con el desarrollo económico del departamento (ver Figura 2-2).

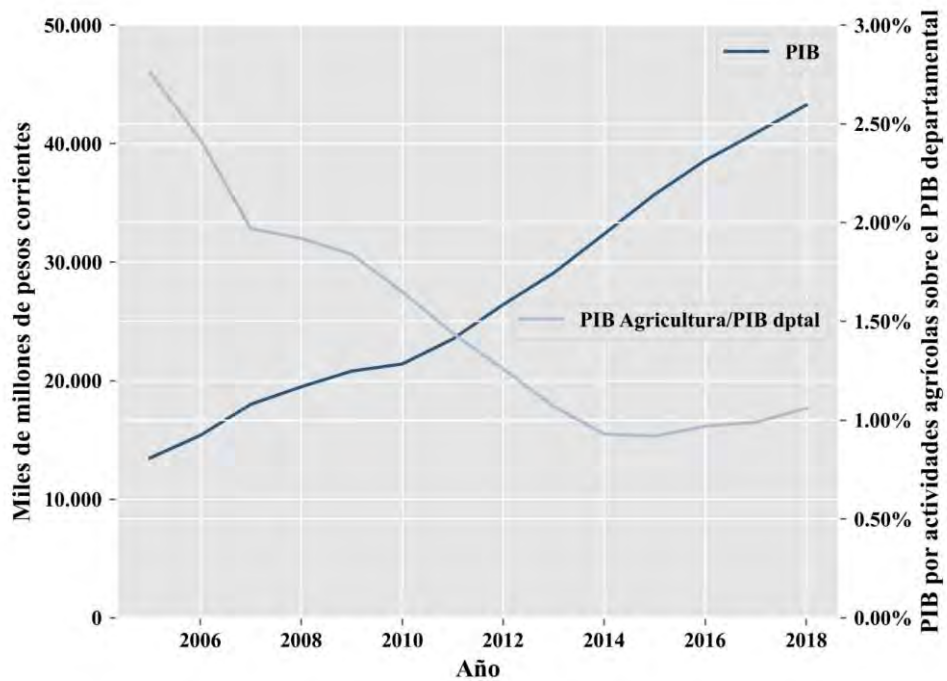


Figura 2-1 Variación del PIB departamental y del porcentaje del PIB de actividades agrícolas
Fuente: Departamento Nacional de Planeación (2020b) con modificaciones.

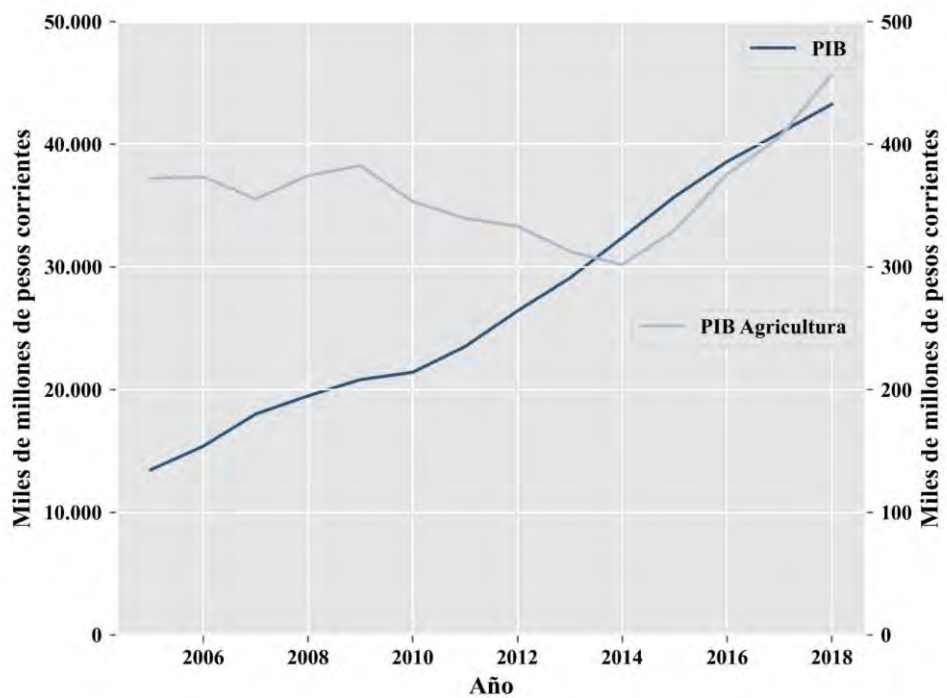


Figura 2-2 Comparación PIB departamental y PIB producto de actividades agrícolas
Fuente: Departamento Nacional de Planeación (2020b) con modificaciones.

En lo referente al sector empresarial, la Figura 2-3 evidencia un progreso: desde 2008, el número de empresas y empleados del sector agrícola se ha incrementado a una tasa más o menos constante. Más allá del decrecimiento entre 2015 y 2017, el gráfico es un indicador positivo, que revela la importancia que este sector ha adquirido a nivel departamental.

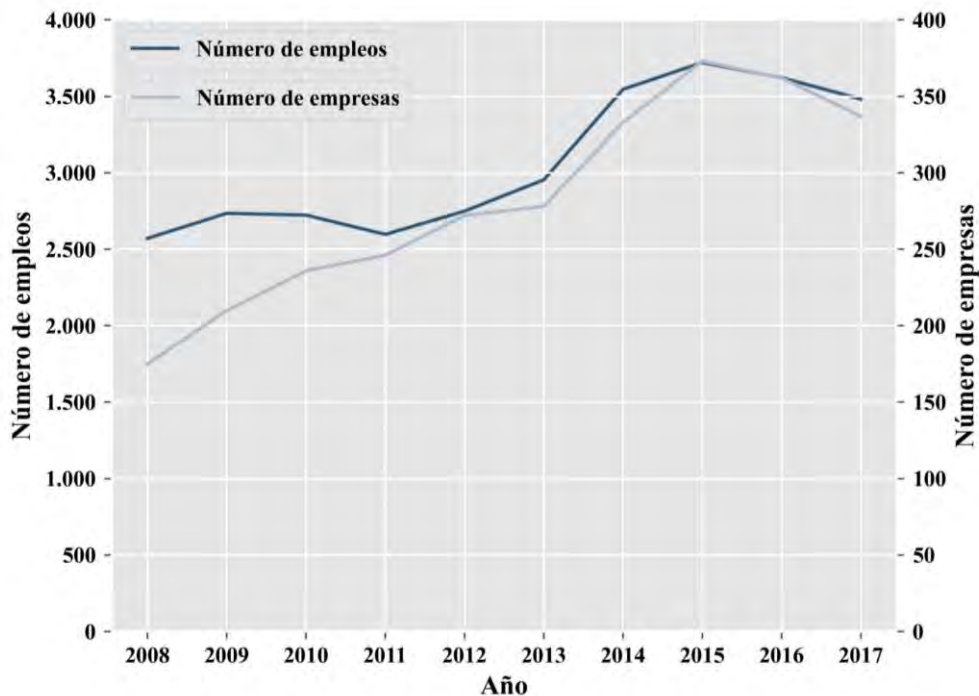


Figura 2-3 Comparación entre el número de empresas y número de empleados en el sector agrícola
Fuente: Departamento Nacional de Planeación (2020b) con modificaciones

Por otra parte, la carencia de infraestructura necesaria para la capitalización del sector manifestada por los productores (DANE, 2015) constituye una limitante y un elemento incidente en el costo logístico de los productos agrícolas lo cual puede trasladarse en un impacto negativo sobre el ingreso mensual promedio de los trabajadores del sector agrícola, disminuyéndolo. La Figura 2-4 muestra que en el Atlántico este ingreso promedio ha incrementado año a año (con excepción de una caída entre 2013 y 2014). No obstante, debe considerarse que la producción es estacional – no todo el año se cosecha – y que en general el costo de vida está por encima de los ingresos medios representados en la Figura 2-4.

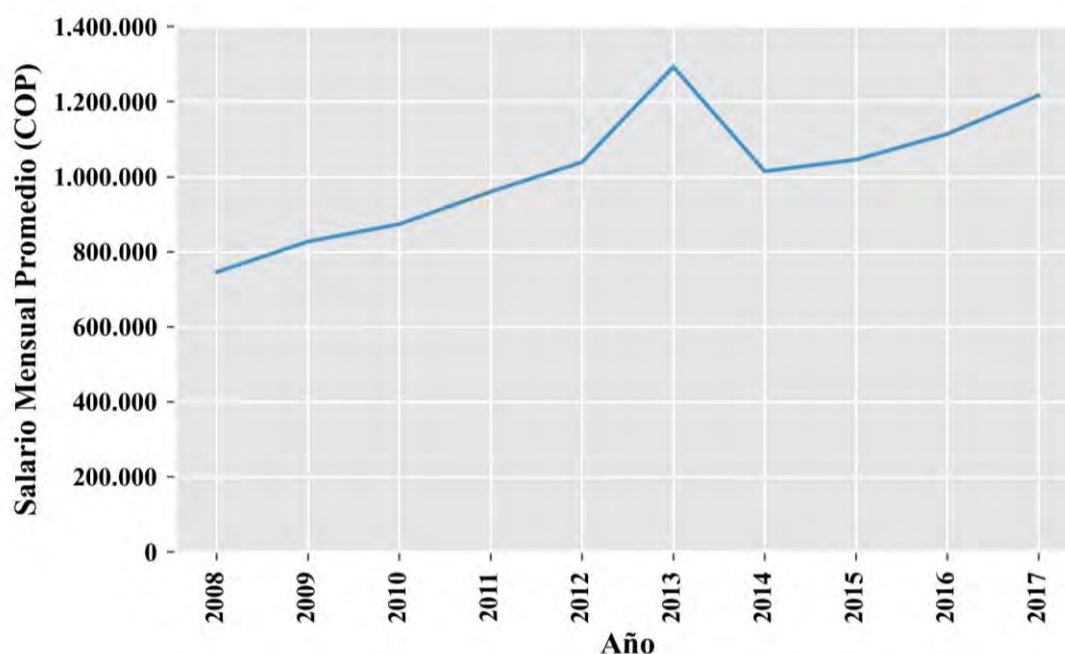


Figura 2-4 Salario promedio para trabajadores del sector agrícola en el Atlántico
Fuente: Departamento Nacional de Planeación (2020b) con modificaciones

2.2 Exportaciones

La información de las exportaciones agrícolas del departamento del Atlántico se obtuvo a partir de datos abiertos del portal DATLAS (2020) del gobierno nacional, clasificando los productos según diferentes categorías. Es importante mencionar que esta clasificación corresponde a criterios propios del autor, ya que diferentes productos podían tener características de más de un grupo. Debido al gran número de destinos internacionales para los distintos productos, se realizó una agrupación por subregión a nivel mundial. A continuación, se muestran gráficos con el valor medio de exportaciones (en dólares) entre 2008 y 2017, para los tres grupos de alimentos de interés: cereales y semillas, frutas, y verduras y hortalizas.

Centroamérica es el principal destino de exportación para los verduras y hortalizas producidos en el departamento del Atlántico. Norteamérica, Medio Oriente y el Caribe le siguen (ver Figura 2-5). Con excepción de Medio Oriente, que revela un promedio de exportaciones de aproximadamente 20.000 dólares durante el período de registro, puede verse que la mayoría de las exportaciones se realizaron al continente americano (Norte, Centro y Suramérica) y el Caribe.

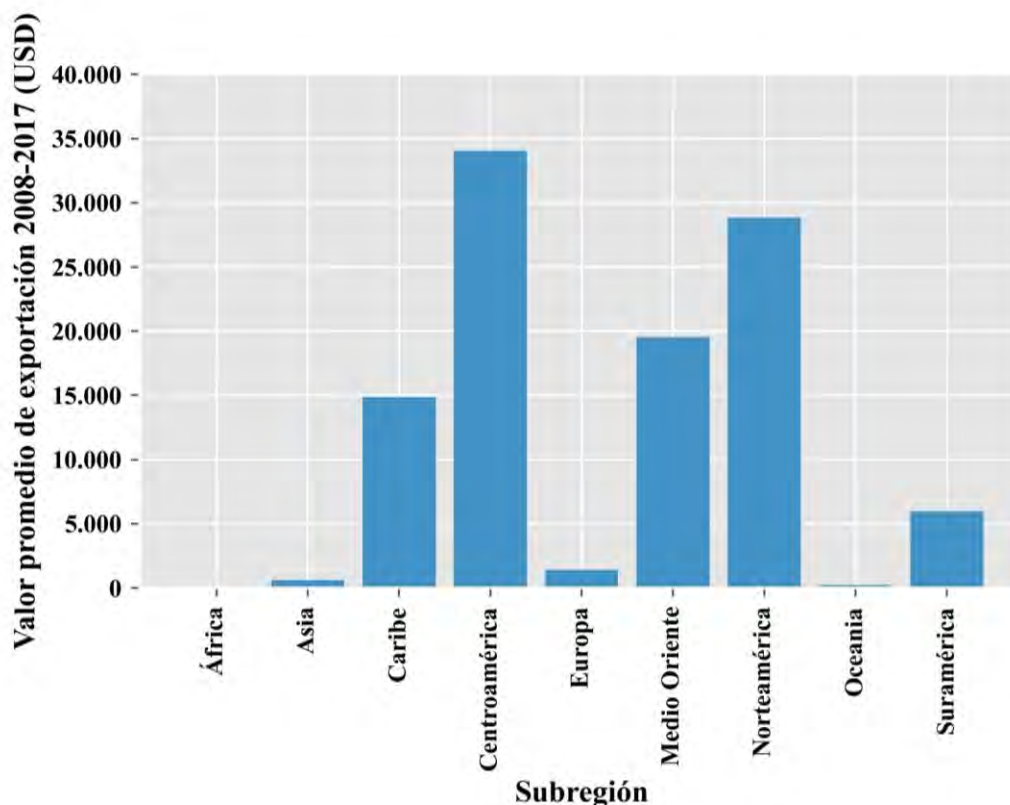


Figura 2-5 Valor promedio de exportación de verduras y hortalizas por subregión
Fuente: DATLAS (2020b) con modificaciones

En el caso de las frutas, el continente africano lidera las operaciones de exportación realizadas, con un promedio superior a los 800.000 dólares, tal como se muestra en la Figura 2-6. La diferencia respecto a las otras regiones es notable. Medio Oriente, que le sigue, registra un promedio de aproximadamente 130.000 dólares. Aunque Europa ha sido la región que ha encabezado las exportaciones de frutas² para Colombia, el departamento del Atlántico tiene como principales compradores a Egipto y Libia (DATLAS, 2020), principalmente de frutas tropicales.

Los cereales son exportados principalmente hacia otros países de Suramérica. Centroamérica, Norteamérica y el Caribe son las otras regiones destino de los cereales producidos en el departamento, por valores entre 15.000 y 25.000 dólares en promedio. Las exportaciones hacia Europa y Asia son menores (Figura 2-7).

² Ver <https://www.portafolio.co/economia/colombia-ahora-le-apuesta-a-las-frutas-en-exportaciones-533449>

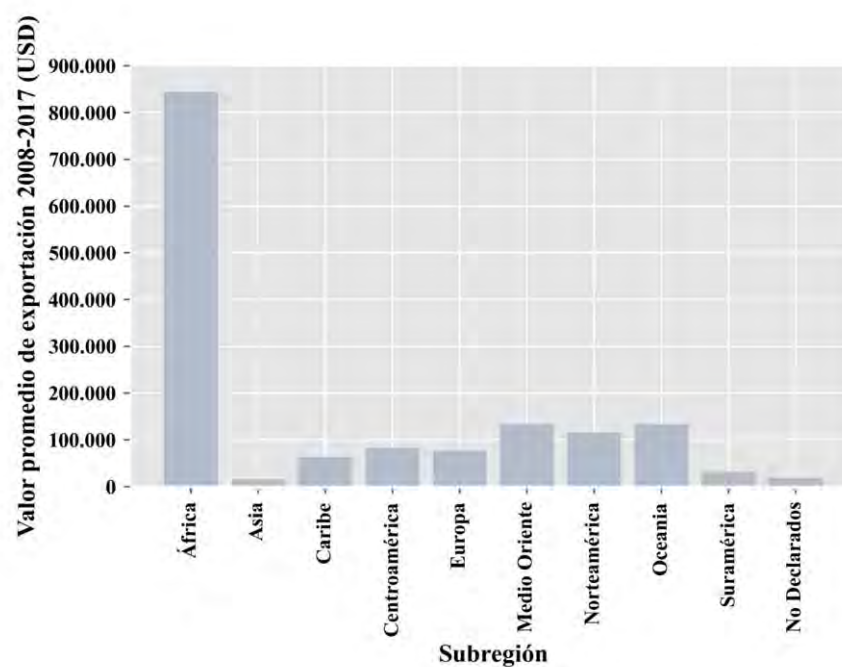


Figura 2-6 Valor promedio de exportación de frutas por subregión
Fuente: DATLAS (2020b) con modificaciones

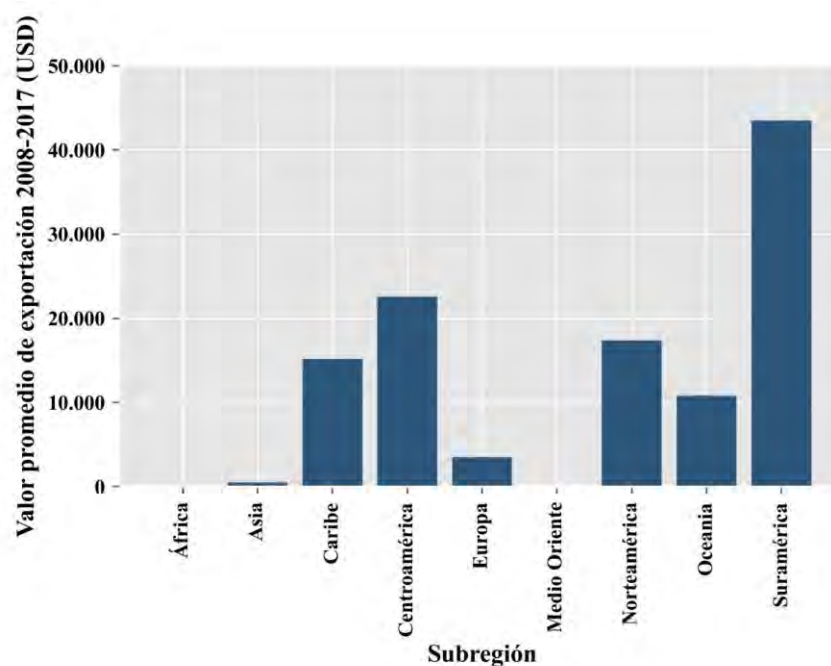


Figura 2-7 Valor promedio de exportación de cereales por subregión
Fuente: DATLAS (2020b) con modificaciones

Los grupos de alimentos presentan patrones de exportación diferentes. Por ejemplo, los cereales y las verduras y hortalizas siguen destinos dentro del mismo continente

americano y el caribe (un destino relativamente cercano), con escasas operaciones hacia Europa y Asia; mientras que las frutas tienen como destino de exportaciones principal a Medio Oriente, con un promedio general de exportaciones mucho mayor. Es importante destacar aspectos relacionados con la información provista por DATLAS: i) el portal tiene una clasificación de productos particular (por ejemplo, un producto es “Confituras, jaleas y mermeladas, purés y pastas de frutas u otros frutos, obtenidos por cocción, incluso con adición de azúcar u otro edulcorante”) que puede pertenecer a una categoría específica de las establecidas aquí (e.g. “frutas”) pero sin corresponder o indicar claramente *cuál* de los productos estudiados aquí es (en el ejemplo mostrado, no es posible saber si se trata de “confituras, jaleas y mermeladas ... ” de mango, guayaba, fresa, o cualquier otra fruta); ii) se desconoce la cantidad de producto exportado, es decir, no se sabe cuántas toneladas fueron enviadas a cada destino. Por lo tanto, la información provista constituye una referencia para conocer los destinos principales por grupo de producto, pero no para establecer *directamente* la demanda de cada producto en cada caso.

2.3 Producción agrícola

Teniendo en cuenta el crecimiento económico y la trascendencia del sector para las autoridades, la gobernación a través del Plan de Ordenamiento Productivo y Social de la Propiedad Rural del Departamento del Atlántico (POPSPR) como parte de las estrategias de planificación para fortalecer el sector productivo, realizó una priorización de alternativas productivas a partir de indicadores como toneladas producidas, área sembrada, área cosechada y rendimiento de cultivos, al igual que por medio de reuniones con los actores del sector en diferentes municipios (Gobernación del Atlántico, 2018). Los productos priorizados fueron: yuca, mango hilaza, melón, maíz tradicional, maíz tecnificado, ganadería - leche, ganadería - carne, acuicultura, pesca, ají topito, plátano, ahuyama, guayaba criolla y porcicultura, cuyos indicadores se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Indicadores de producción promedio (2008-2017) para el departamento por productos priorizados

PRODUCTO	Producción (Ton)	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (Ton-ha)
Ahuyama	2969,21	441,97	341,54	4,10
Ají	1027,33	272,08	205,14	5,64
Guayaba	6537,18	675,51	469,25	8,86
Maíz tecnificado	3108,28	1848,95	1433,18	1,18
Maíz tradicional	6769,79	8575,98	6257,06	0,93
Mango	15543,71	1943,71	1171,5	10,62
Melón	7130,63	828,47	610,41	10,08
Plátano	5925,14	649,8	517,12	4,79
Yuca	53696,64	7420,85	5773,2	7,36

Fuente: MINAGRICULTURA (2019a) con modificaciones

La Figura 2-8 muestra la distribución de la producción media por producto priorizado para cada municipio del departamento. La yuca se presenta como el producto principal, con registros predominantes en cada municipio. Es interesante ver cómo municipio a municipio la dinámica de producción varía, con productos como el mango o el plátano que compiten por el segundo lugar en términos de toneladas producidas, y otros en los cuales la producción es más bien equitativa entre los diferentes productos priorizados.

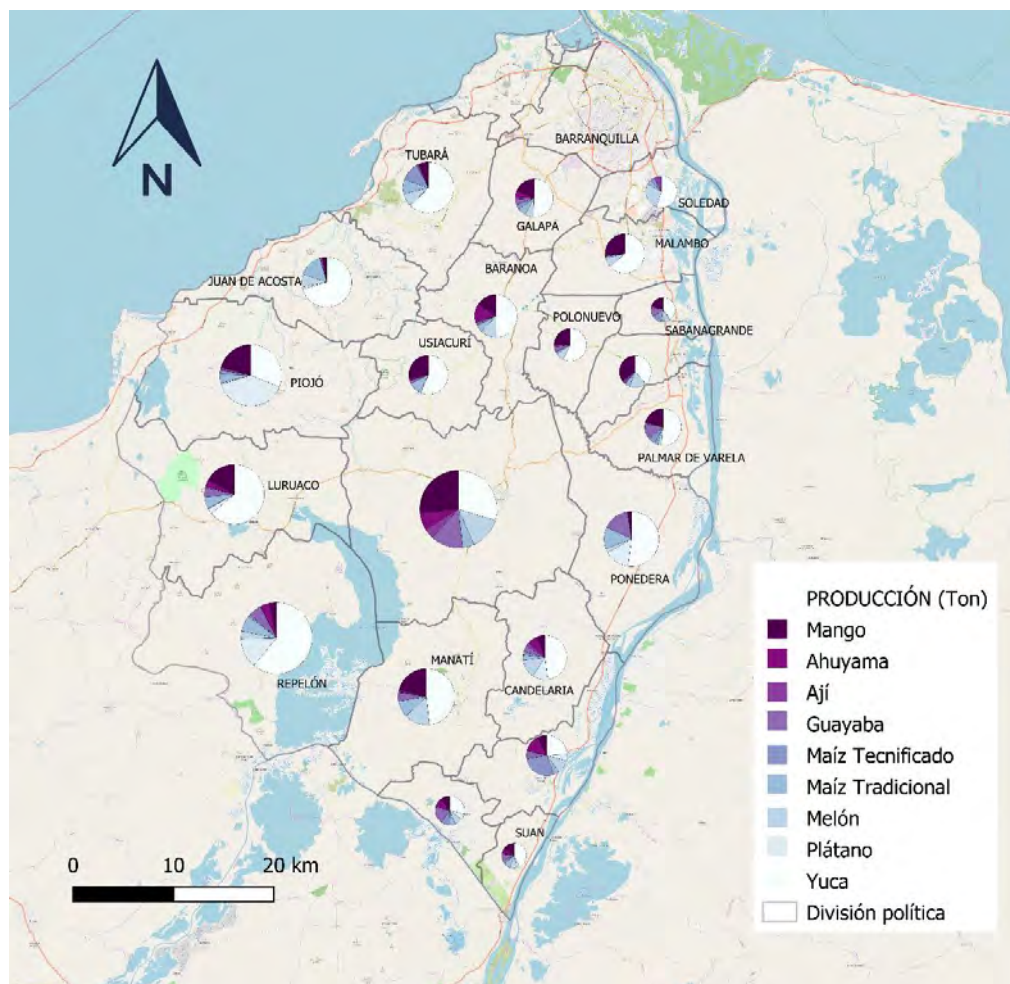


Figura 2-8 Distribución de producción por producto priorizado por municipio
Fuente: MINAGRICULTURA (2019a) con modificaciones

Otro de los indicadores relevantes es el rendimiento de los productos, que se define como la relación simple de toneladas producidas en una hectárea. En este caso, frutas como el mango, la guayaba y el melón muestran el mayor rendimiento, seguidos del ají. Otros productos como el plátano y la ahuyama tienen rendimientos irregulares – valores altos en ciertos municipios y muy bajos en otros –, mientras que ambos tipos de maíz poseen el rendimiento más bajo entre los productos seleccionados. El detalle municipio a municipio puede verse en la Figura 2-9.

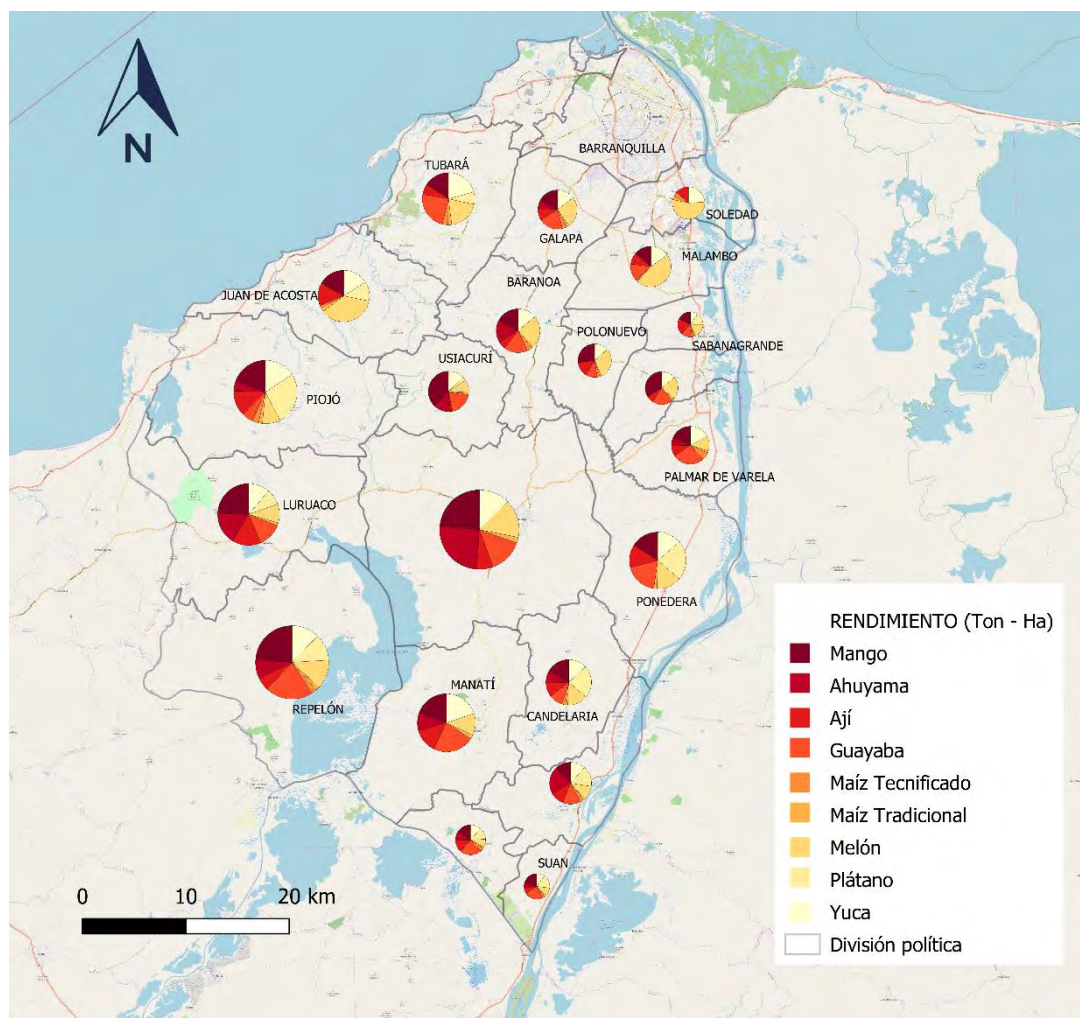


Figura 2-9 Rendimiento de producto priorizado por municipio
Fuente: MINAGRICULTURA (2019a) con modificaciones

La Tabla 2-2 presenta una clasificación de los productos priorizados ya mencionados. Esta clasificación agrupa los productos en tres categorías: 1) verduras y hortalizas, 2) frutas y 3) cereales. La clasificación ha sido definida por el autor.

Tabla 2-2 Clasificación de alimentos en grupos

Productos priorizados	Subcategoría	Categoría
Yuca	Tubérculo	Verduras y hortalizas
Mango de hilaza	Fruta	Fruta
Melón	Fruta	Fruta
Maíz tradicional	Cereal	Cereal
Ají topito	Vegetal	Verduras y hortalizas
Plátano	Fruta	Fruta

Ahuyama	Hortaliza	Verduras y hortalizas
Guayaba criolla	Fruta	Fruta
Maíz tecnificado	Cereal	Cereal

Fuente: elaboración propia.

La Figura 2-10 muestra la distribución porcentual de la producción en cada municipio del departamento acorde a la clasificación de la Tabla 2-2. La producción de verduras y hortalizas es predominante, impulsada por la producción de yuca, el alimento con mayor producción media en todo el departamento (más de 50 mil toneladas/año). Le sigue la producción de frutas, la cual supera a la primera en municipios como Piojó, Sabanalarga, Santa Lucía y Santo Tomás. La producción de cereales es la menor de todas, con porcentajes excepcionales en Tubará y Campo de la Cruz, donde alcanzan más del 20 y 30% respectivamente

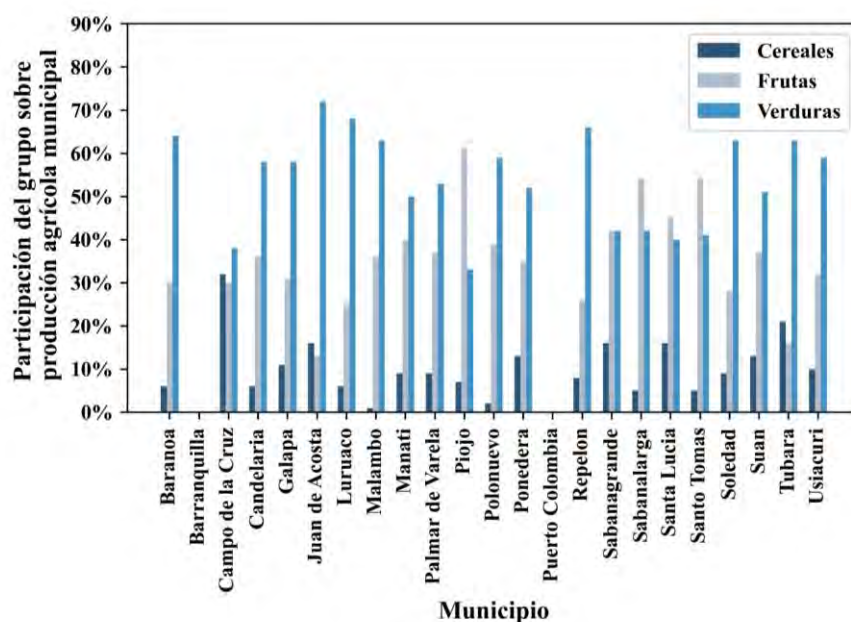


Figura 2-10 Porcentaje de participación del grupo de alimentos sobre la producción agrícola total del municipio
Fuente: elaboración propia.

En lo referente a las unidades de producción agrícola (UPA) – es decir, la extensión de las propiedades destinadas a ese propósito – destaca el hecho de que prácticamente la mitad de las UPA del departamento (49%) tienen menos de 3 hectáreas. En contrapartida, solo el 5% de las UPA tienen una extensión de 50 hectáreas o más. Esto muestra que la producción agrícola en el departamento recae principalmente sobre pequeños agricultores. La distribución porcentual de las UPA según extensión se muestra en la Figura 2-11.

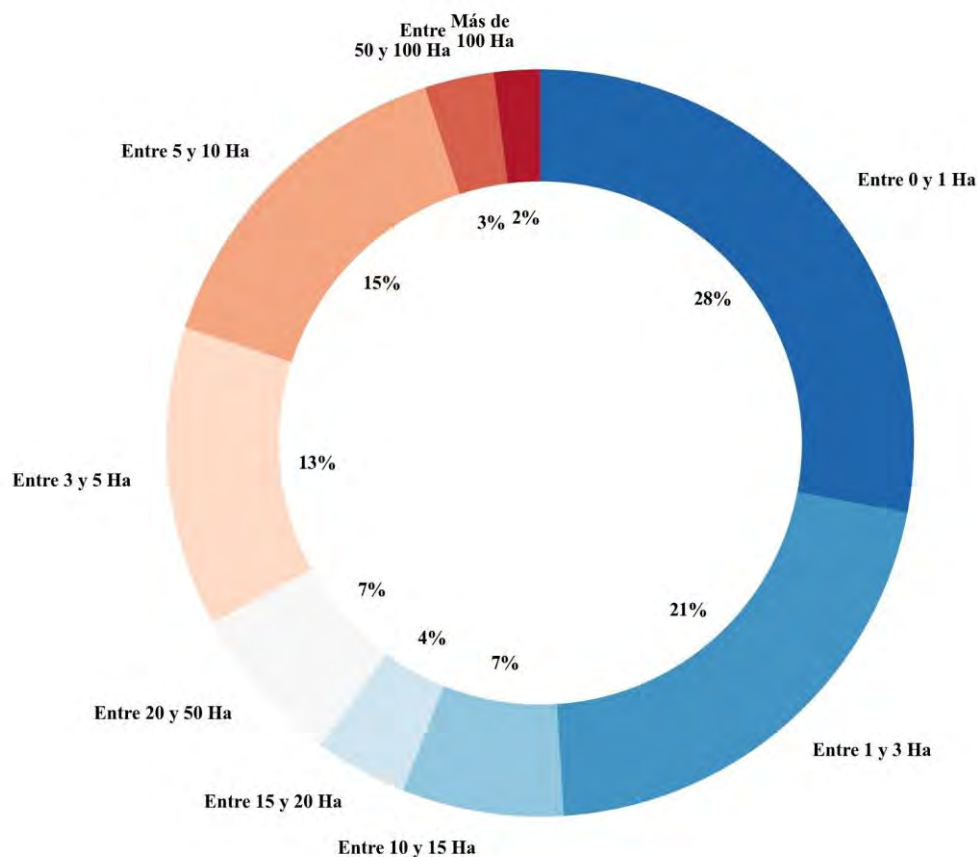


Figura 2-11 Distribución de unidades de producción agrícola según su extensión
Fuente: Departamento Nacional de Planeación (2020b) con modificaciones

2.4 Aspectos logísticos

Según la Encuesta Nacional de Situación Nutricional, más del 40% de los hogares colombianos enfrenta condiciones de inseguridad alimentaria (ENSIN, 2010), es decir, no tienen acceso de forma permanente y oportuna a alimentos con la suficiente calidad y cantidad para suplir sus necesidades (Programa Especial para la Seguridad Alimentaria - PESA - Centroamérica, 2011). En su entrega más reciente, la ENSIN reveló que la región Caribe es la que posee el mayor índice de prevalencia de inseguridad alimentaria (65%) (Ministerio de Salud, 2015). Por otra parte, acorde al Departamento Nacional de Planeación (DNP), en Colombia se presenta una preocupante situación de ineficiencia en las cadenas alimentarias, siendo que el 34% de la cantidad disponible de alimentos se ve perdida y desperdiciada anualmente (9,74 millones de toneladas) (Departamento Nacional de Planeación, 2016), con indicadores de pérdida (64%) por encima del promedio mundial (54%). Asimismo, el informe del DNP (2016) señala que “de la cantidad perdida de alimentos, el 40,5% (3,95 millones toneladas) lo hacen en la etapa de producción agropecuaria y el 19,8 % (1,93 millones de toneladas) se pierde en el proceso de postcosecha y almacenamiento” (p. 23). Si bien el estudio mencionado no realizó estimaciones a nivel

departamental, la región caribe presenta el segundo mayor índice de pérdida de alimentos en el sector agrícola, como puede verse en la Figura 2-12.

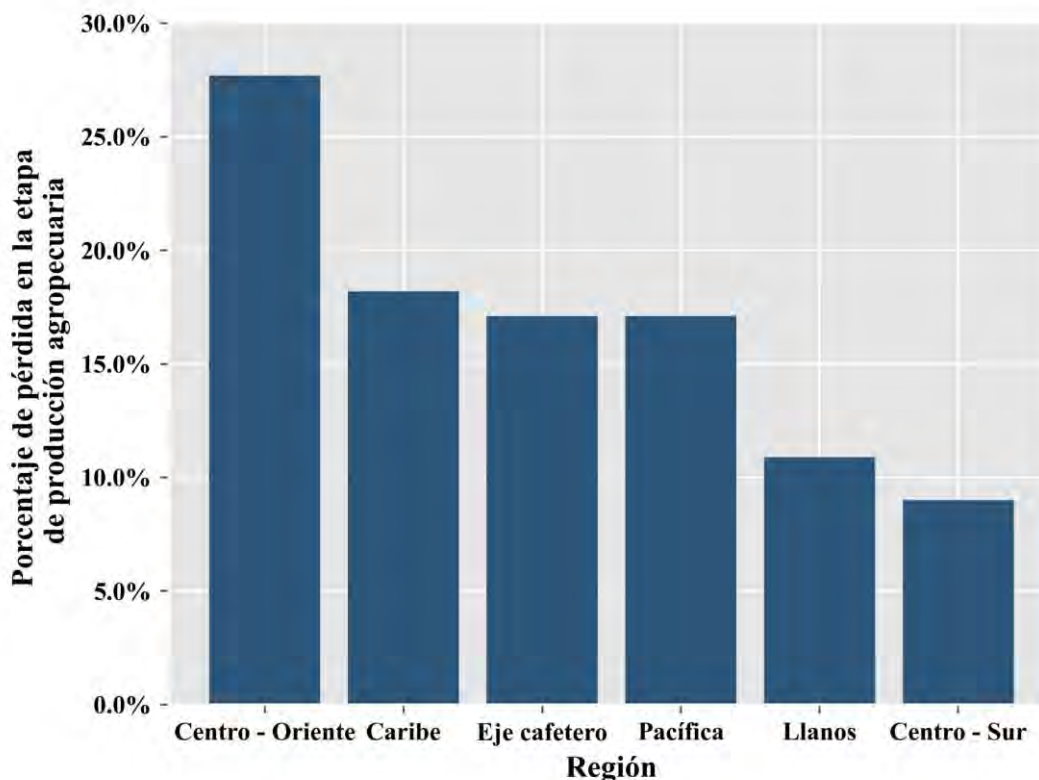


Figura 2-12 Pérdida de alimentos por regiones
Fuente: Departamento Nacional de Planeación (2016) con modificaciones.

Ante esta situación, el DNP (2016) presenta una serie de recomendaciones para el sistema de mercado, entre las que destacan “mejorar la logística de almacenamiento de alimentos, evitar el apilamiento y cualquier práctica que dañe los alimentos; distribuir los excedentes alimentarios de minoristas o fabricantes por vías alternativas (más baratas), mientras que los alimentos desperdiciados se utilizan como subproducto; hacer uso de los bancos de alimentos, cuando los alimentos estén prontos al vencimiento o ya no cumplan estándares de exhibición; mejorar la claridad del etiquetado en cuanto a fechas de vencimiento e instrucciones de almacenamiento” (p. 45).

En el departamento del Atlántico prima el modelo de intermediario mayorista como integrante esencial de los procesos de comercialización de productos agropecuarios, principalmente perecederos, cultivados con limitaciones técnicas y procesos elementales. Este integrante de la cadena se encarga de proveer a los detallistas y distribuidores de grandes superficies. Dicho esquema de la cadena de distribución de productos agropecuarios se ve reforzado por la falta de sistemas de transporte especializados e instalaciones para el acopio de los productos (Gobernación del Atlántico, 2016). El MINAGRICULTURA (2019b)

describe el proceso de abastecimiento de alimentos en el departamento de la siguiente con cifras, de la siguiente manera: “las tiendas y comerciantes de las plazas de mercado se aprovisionan en un 48% directamente del productor, un 26% de la Plaza de Mercado, el 10% en la Central de Granabastos y el 16% en otros sitios” (p. 34).

Durante la recolección de información para esta investigación no se encontró información oficial (i.e. de entes gubernamentales o investigaciones publicadas) en las cuales se hiciera un seguimiento de las tarifas de transporte, valor de venta (percibido por los agricultores) y destino de los productos.

3 Diseño de cadena de suministro agrícola. Revisión de la literatura

Las cadenas de suministro pueden definirse como una red integrada de instalaciones y opciones de transporte para el suministro, manufactura, almacenaje y distribución de materiales y productos (Garcia & You, 2015). Chopra & Meindl (2016) se refieren al diseño de una cadena de suministro como un proceso estratégico que comprende decisiones relativas al número y ubicación de las instalaciones de producción y almacenamiento, la cantidad y capacidad en cada instalación, la asignación de actividades a los recursos y la selección de proveedores, la asignación de clientes a una o más ubicaciones, la selección de modos de transporte y el tipo de sistema de información a utilizar. Su estructura o topología influye considerablemente en la forma en que las empresas ejecutan las estrategias, se desempeñan y obtienen ventajas competitivas (Calleja et al., 2018).

Las cadenas de suministro agrícolas tienen ciertas particularidades que las diferencian de otras. Se caracterizan por factores tales como la calidad y seguridad de los productos, así como la variabilidad relacionada al clima (Salin, 1998), variabilidad en la demanda, en el precio y una vida de almacenaje limitada (Ahumada & Villalobos, 2009). Amorim et al., (2012) definen la vida útil³ de los productos como “el período de tiempo en el que el producto deja de tener valor para el cliente debido a la falta de las características iniciales tácitas que se supone que tiene el producto.” (p. 90). El sector de alimentos tiene un entorno en el cual la calidad y la seguridad tienen un papel importante (Akkerman et al., 2010) y donde la alta perecibilidad lleva a pérdidas y desperdicios considerables (Yu & Nagurney, 2013). Además, la calidad y la frescura de los productos tienen una importante incidencia en la decisión de compra de los clientes (Mirzaei & Seifi, 2015; Rohmer et al., 2019).

Estas cadenas, acorde a Ahumada & Villalobos, (2009), son de dos tipos: agro – alimentos frescos (perecederos) y agro – alimentos no perecederos. Amorim et al., (2013) definen un producto perecedero como aquel cuyo estado físico empeora notoriamente y/o pierde valor bajo la percepción de un consumidor. La modelación del deterioro de los productos alimenticios es compleja, ya que en el proceso intervienen factores como temperatura, humedad, presión, luz y la presencia de microorganismos en el ambiente en que se encuentren los productos. Existen diversas formas de abordar la modelación del deterioro de la calidad, incluyendo aproximaciones desde la química, como la ecuación de Arrhenius (Zanoni & Zavanella, 2012) o la propuesta por Labuza (1982). No obstante, una de las más reconocidas y utilizadas es la formulación de Peleg et al., (2002) quienes propusieron utilizar un modelo de *ley de potencia de Weibull* para describir la degradación isotérmica de la calidad de los alimentos, dependiendo de la temperatura y el tiempo de almacenamiento, como se muestra a continuación:

$$q(T, t) = q_0 e^{-b(T)t^{n(T)}}$$

Donde $q(T, t)$ es la calidad q para una temperatura T y un tiempo t , q_0 es la calidad inicial, t es el intervalo de tiempo, $b(T)$ y $n(T)$ son coeficientes dependientes de la temperatura. Su formulación incluye el tiempo y la temperatura, los cuales son los principales

³ Indicado originalmente como *shelf life*

parámetros que afectan la vida útil de los productos (W. Wu et al., 2019). Originalmente, el modelo de Weibull fue desarrollado para expresar la falla de un sistema sometido a condiciones de tensión a lo largo del tiempo. No obstante, la función de distribución de Weibull se ha utilizado recientemente para describir la cinética de degradación química (Cunha et al., 1998; Zheng & Lu, 2011). Algunos ejemplos pueden verse en los trabajos de Manso et al., (2001), Odriozola-Serrano et al., (2009), y Oms-Oliu et al., (2009). La distribución de Weibull ha sido ampliamente utilizada para representar el deterioro de productos en numerosas publicaciones en el área de investigación de operaciones en cadenas de suministro o estudios específicos de control de inventario (Banerjee & Agrawal, 2017; Chakraborty et al., 2018; Giri et al., 2003; S. Pal et al., 2014; Rapolu & Kandpal, 2020; Sanni & Chukwu, 2013; Skouri et al., 2009; K. Wu, 2001) por ser aquella que mejor representa este proceso (Pahl & Voß, 2014). Es importante mencionar que su tratamiento es especialmente complejo en términos computacionales debido al carácter no lineal.

Los alimentos perecederos, incluyendo frutas, verduras y hortalizas, necesitan mantenerse en refrigeración o congelación a través de la cadena de suministro para prolongar y preservar su calidad: si la temperatura de almacenamiento no es adecuada, los alimentos experimentan reacciones químicas aceleradas (Musa Kaleem Baloch et al., 2011; Singh et al., 2013) que afectan la firmeza, la textura (M. K. Baloch & Bibi, 2012), y hacen que el producto madure más rápido. En general, de no mantener los productos perecederos en el rango de temperatura deseado, la estimulación del crecimiento de patógenos y microorganismos tendrá lugar, y afectará la calidad del producto, haciéndolo incluso incomedible (Mercier et al., 2017; Shen et al., 2011). Dichos alimentos pierden valor nutricional y sabor desde el momento mismo en que son cultivados. Este proceso de degradación continúa hasta que los productos son descartados (Osvald & Stirn, 2008). Por tanto, mantener los productos a una temperatura adecuada es crítico para maximizar su vida útil (W. Wu et al., 2019).

Las cadenas de productos perecederos tienen además otras particularidades que las hacen más complejas en términos logísticos. La variación de la calidad durante las etapas de transporte y almacenamiento se convierte un aspecto altamente complejo en el suministro de alimentos perecederos para los consumidores (Ferrer et al., 2008; Rong et al., 2011; Yu & Nagurney, 2013). Asimismo, la gestión de inventario representa un factor crucial para las operaciones de las agro cadenas de suministro. Mantener bajos niveles de inventario genera pérdidas económicas potenciales debido a demandas insatisfechas. Por otra parte, mantener niveles de inventario excesivos no solo incrementa los costos de inventario, sino que además llevará a potenciales costos adicionales debido al carácter perecedero de los productos (i.e. productos que se deterioran y ya no pueden ser vendidos) (Galal & El-Kilany, 2016). Si tales características no se gestionan apropiadamente, pueden generar pérdidas económicas notables (Chintapalli, 2014; Galal & El-Kilany, 2016). Por ende, el adecuado diseño y gestión de las cadenas de suministro de productos perecederos representa un desafío logístico.

Tradicionalmente, las decisiones estratégicas como las decisiones de localización de instalaciones son tomadas sin considerar las decisiones tácticas y operacionales. Además, las

decisiones estratégicas son tomadas antes de las operacionales y tácticas (Shahabi et al., 2014). Sin embargo, este método de toma de decisiones puede no resultar en la estructura más efectiva y podría llevar a costos adicionales acorde a Snyder et al., (2007). En años recientes, una tendencia a la integración de decisiones estratégicas, tácticas y operacionales se ha levantado a través del establecimiento de modelos de localización – inventario (Dai et al., 2018). Según Diabat & Richard (2015), en general, los modelos de localización se enfocan en la maximización de la eficiencia de la cadena de suministro mientras que las decisiones de inventario se enfocan en el mejoramiento de la capacidad de respuesta. Estos dos problemas son interdependientes y deberían ser manejados simultáneamente (no secuencialmente), en aras de minimizar el costo total o maximizar los beneficios.

Aunque la literatura relacionada con problemas de localización – inventario es relativamente rica, pocos estudios han abordado este problema para productos perecederos (Dai et al., 2018; T. Wu et al., 2015). Dai et al., (2018) desarrollaron un modelo de localización – inventario (LI) para la red de una cadena de suministro que involucraba productos perecederos en la cual las restricciones de capacidad y emisiones fueron abordadas por medio de restricciones difusas. Firoozi et al., (2014) formularon un modelo matemático mixto (entero – no lineal) que integraba decisiones de localización y control de inventario. En su estudio, los productos tenían una vida útil determinada, permitiéndoles incluir la perecibilidad. Firoozi et al., (2013) diseñaron una red de distribución para productos perecederos con vida útil fija, evaluando diferentes políticas de inventario. El modelo matemático debía decidir la cantidad a ordenar, si un centro de distribución era abierto o no, así como su asignación a los clientes.

El diseño de una red logística para productos perecederos con deterioro de calidad heterogéneo fue propuesto por de Keizer et al., (2017). El estudio fue motivado por la red de distribución europea de flores. Los autores aplicaron una modelación de la calidad por etapas, en la cual cada vez que el producto *pasaba* de una etapa de la cadena logística a otra, mantenía su nivel de calidad (en el mejor de los casos) o se deterioraba. Rafie-Majd et al., (2018) solucionaron un ambicioso problema de localización – inventario – ruteo, multi – período y con demanda estocástica, para productos con una vida de anaquel fija (máxima), asignada como un número de períodos específico para cada tipo de producto. Los autores implementaron un algoritmo de relajación Lagrangiana para resolver diferentes problemas, con brechas de solución mínimas.

Eskandari-Khanghahi et al., (2018) resolvieron un problema multiobjetivo para una cadena de suministro plaquetas considerando incertidumbre. La sangre es un producto perecedero. Los autores diferenciaron entre sangre “joven” y sangre “vieja”, acorde a la vida remanente del producto, diferenciando igualmente entre pacientes que requerían uno u otro tipo de sangre. El modelo propuesto decidía si las instalaciones eran abiertas de forma permanente o no, y determinaba los niveles de inventario de sangre. Programación posibilista difusa fue utilizada para resolver el problema. Ghezavati et al., (2017) abordaron la optimización de productos perecederos para una agro – cadena de suministro. Los autores incluyeron expresiones para modelar la pérdida de *frescura* y la madurez de los productos.

El modelo propuesto incluía decisiones sobre el nivel de inventario de cultivos cosechados para productos con un nivel de frescura determinado en cada período, y sobre la apertura de almacenes. El método de descomposición de Benders fue utilizado para resolver un caso de estudio para el tomate.

Zahiri et al., (2018) plantearon un problema multi-objetivo que consideraba economías de escala e incertidumbre en la demanda y oferta para una cadena de suministro farmacéutica. La vida útil de los productos era fija. El modelo, que consideraba decisiones estratégicas y tácticas, fue resuelto utilizando optimización robusta. Savadkoobi et al., (2018) resolvieron un problema de programación entera mixta de localización – inventario con múltiples periodos y productos perecederos. Una política continua de revisión de inventario fue implementada. El problema fue abordado por medio de programación posibilista. Mogale et al., (2019) abordaron el problema de acopio y distribución de granos en India. Los autores resolvieron a través de técnicas metaheurísticas un modelo de programación entera mixta que buscaba optimizar los costos y las emisiones. Las decisiones por tomar se relacionaban con la apertura de instalaciones en los diferentes niveles de la red, los niveles de inventario, y los flujos entre ellas. T. Wu et al., (2015) utilizaron una heurística codiciosa (*greedy*) para dar solución a un problema de programación entera mixta no lineal en el cual se abordaban economías de escala e inventario perecedero. El modelo multi – período propuesto permitía *backlogging*, y debía además determinar la localización óptima de las instalaciones.

Desde una perspectiva general, los modelos descritos abordan productos perecederos la cual es una categoría en la que se pueden incluir alimentos, productos farmacéuticos e incluso algunos dispositivos tecnológicos. Sin embargo, la literatura dedicada al sector de alimentos agrícolas de manera específica es bastante limitada. Pocos estudios como los de Tsao, (2013) y Ghezavati et al., (2017) abordan problemas relacionados con este sector. La revisión de la literatura realizada por Lucas & Chhajer, (2004) lista diferentes aplicaciones a cadenas de frutas, verduras, y granos, entre otros. Soysal et al., (2014) llevaron a cabo una modelación de la red logística de carne y ganadería, incluyendo el impacto ambiental generado por las emisiones de los vehículos utilizados para el transporte. En el contexto colombiano Orjuela-Castro et al., (2017) reportan un estudio de localización de instalaciones para la cadena de suministro de frutas, considerando pérdidas de producto debido a las variaciones en la temperatura y humedad. Si bien estos tres últimos estudios son aplicaciones al sector agrícola, no consideran decisiones de localización e inventario de forma simultánea.

Acorde a la revisión de la literatura realizada, no se encontraron investigaciones que abordaran el diseño de una cadena de suministro para productos perecederos bajo con un contexto de modelación multi – producto, multi – período y con la posibilidad de vincular decisiones estratégicas (bajo la posibilidad de elección de bodegas refrigeradas o no refrigeradas) y táctico – operacionales (como la gestión de inventarios) que afectaran la perecibilidad de los productos. Lo anterior ratifica el sector de agro alimentos como uno con potencial para la implementación estos modelos. La presente investigación constituye una contribución para cerrar esta brecha.

4 Metodología

Las fuentes de información, consideraciones metodológicas y suposiciones de modelación son descritas en este capítulo.

4.1 Contexto de modelación

El contexto de modelación supone que los productores agrícolas están asociados y pertenecen a una organización que distribuye sus productos principalmente en al Área Metropolitana de Barranquilla y departamentos aledaños (Magdalena y Bolívar). La organización pretende diseñar una red logística que le permita maximizar el beneficio percibido por la comercialización de los productos, en la cual éstos son entregados a unos *vendedores* (eslabón final), luego de ser consolidados y eventualmente almacenados en bodegas dentro del departamento. Estas bodegas tienen las funciones de consolidar la carga para crear pequeñas economías de escala y almacenar productos considerando los desfases temporales de la demanda y la oferta, buscando satisfacer la demanda al máximo posible. El precio de venta de los productos intenta reflejar la disposición a pagar por los compradores (integrantes del eslabón final), el cual está directamente relacionado con la calidad de los productos.

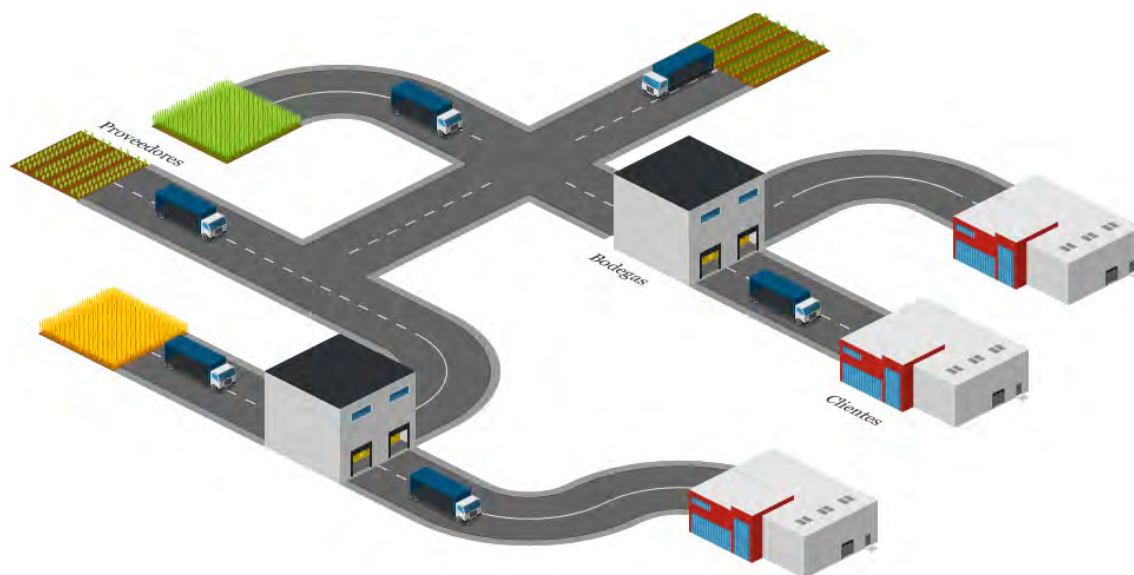


Figura 4-1 Diagrama genérico de la red propuesta

Fuente: elaboración propia.

La Figura 4-1 representa los eslabones o miembros de la red propuesta. La red considera costos producción de los productos agrícolas, de arriendo de instalaciones, de transporte, y de inventario. Además, conociendo que los alimentos agrícolas son productos

perecederos susceptibles a las condiciones ambientales, especialmente la temperatura y humedad, se desea evaluar si es conveniente hacer uso de instalaciones refrigeradas que preserven los productos en condiciones apropiadas. No obstante, la elección de instalaciones refrigeradas implica costos mucho más elevados que los de una instalación regular. Esto añade complejidad al diseño de la red, el cual se considera un problema NP – duro *per se*. Las suposiciones de modelación son las siguientes:

Suposiciones

- i. Todos los productos tienen una calidad máxima al momento de ser recibidos en la bodega, y esta calidad decae a partir de entonces.
- ii. Un conjunto de productos del tipo p producido en el período t se deteriora de forma homogénea.
- iii. El tiempo de transporte de los productos y las operaciones logísticas (e.g. como carga, descarga) asociadas es inferior a un período para todos los productos y todos los destinos considerados.
- iv. El precio de venta está asociado directamente a la calidad del producto, la cual se *pierde* (degrada) en función del tiempo y la temperatura.
- v. Durante las operaciones logísticas correspondientes (carga, descarga, alistamiento del producto para despacho desde la bodega, etc.) el producto sufre deterioro y está por un tiempo mínimo en la bodega. Ello implica precios en calidad máxima diferentes según el tipo de bodega.
- vi. No existen intermediarios en la red por lo que no hay costo asociado a su comisión por transacciones
- vii. Todos los costos permanecen fijos durante el horizonte de estudio.
- viii. Las instalaciones tienen capacidad limitada.
- ix. Las instalaciones refrigeradas cuentan con las condiciones de salubridad, seguridad y refrigeración de forma que los productos puedan ser manejados apropiadamente y preservar su calidad.
- x. Diferentes productos pueden ser almacenados en una misma instalación.
- xi. No se permite abastecimiento (flujo de productos) entre centros de distribución o vendedores.
- xii. No se permite registro de pedidos atrasados (*backlogging*)
- xiii. La demanda de productos en los puntos de interés (clientes) es satisfecha únicamente por la producción agrícola de los municipios.
- xiv. La demanda es conocida y determinística.

Conjuntos

I : posibles locaciones para las bodegas $I = \{1, 2, \dots, I\}$

J : clientes, $J = \{1, 2, \dots, J\}$

M : proveedores $M = \{1, 2, \dots, M\}$

P : conjunto de productos $P = \{1, 2\}$

T : periodos $T = \{1, 2, \dots, T\}$

K : calidad del producto, $K = \{1, 2, \dots, K\}$

R : tipos de bodega $R = \{1, 2, \dots, R\}$

Parámetros

C_{pmi} : costo de transporte por unidad del producto p del proveedor m a la instalación i

C_{pij} : costo de transporte por unidad del producto p de la bodega i al vendedor j

C_{lp} : costo de mantener una unidad del producto p en inventario en la instalación i

C_F : costo fijo de una bodega regular

C_Z : costo fijo de una bodega refrigerada

C_{prod}^p : costo de producción por unidad de producto p

CAP_r : capacidad de almacenamiento de una bodega de tipo r

V_{ps} : precio de venta V del producto p producido en el periodo s

D_{pjt} : demanda del producto p por el cliente j en el periodo t

$CapOfer_{mp} \{M, P\}$: capacidad en la oferta del proveedor m para el tipo de producto p

B : un número muy grande

α_p : parámetro de escala de la distribución de Weibull ($1 > \alpha_p > 0$) para el tipo de producto p en bodegas regulares

β_p : parámetro de forma de la distribución de Weibull ($2 \geq \beta_p > 0$) para el tipo de producto p en bodegas regulares

λ_p : parámetro de escala de la distribución de Weibull ($1 > \lambda_p > 0$) para el tipo de producto p en bodegas refrigeradas

θ_p : parámetro de forma de la distribución de Weibull ($2 \geq \theta_p > 0$) para el tipo de producto p en bodegas refrigeradas⁴

Variables de decisión

X_i : 1 si se abre una bodega regular en la locación i , 0 en otro caso

⁴ Los parámetros $\alpha_p, \beta_p, \lambda_p, \theta_p$ están en función de la temperatura. La idea es, por supuesto, que los parámetros λ_p y θ_p permitan que el tipo de producto p se conserve en mejores condiciones.

Z_i : 1 si se abre una bodega refrigerada en i , 0 en otro caso

A_{im} : 1 si la producción del proveedor m es consolidada en la instalación i , 0 en otro caso

Y_{ij} : 1 si el cliente j es asignado a la instalación i , 0 en otro caso

Q_{mpt} : cantidad producida por el municipio m del producto p en el período t

I_{pitk} : nivel de inventario del producto p con calidad k en la instalación i en el período t

W_{pijtk} : cantidad a vender del producto p con calidad k de la bodega i al cliente j en el período t

S_{pmikt} : cantidad de producto p con calidad máxima ($k = I$) enviada del proveedor m a la instalación i en el período t

4.1 Formulación del modelo

La maximización del beneficio total (BT) es formulada como el ingreso por ventas (InV), menos el costo de producción (Cpr), el costo de transporte de los productos desde los proveedores hasta las bodegas (CTr₁), menos el costo de transporte desde las bodegas hasta los vendedores (CTr₂), menos el costo de ubicar bodegas regulares (CL), menos el costo de ubicar instalaciones refrigeradas (si el modelo así lo decide) (CL_e), menos los costos de inventario (CI):

$$MAX BT = InV - Cpr - CTr_1 - CTr_2 - CL - CL_e - CI$$

Detallado y de acuerdo con las suposiciones antes descritas, la formulación del modelo es:

$$\begin{aligned}
 MAX BT = & \sum_P \sum_I \sum_J \sum_T \sum_K W_{pijtk} \left[V_{psi} e^{-\alpha_p(t-s)^{\beta_p}} X_i + V_{psi} e^{-\lambda_p(t-s)^{\theta_p}} Z_i \right] \\
 & - \sum_M \sum_P \sum_T Q_{mpt} C_{Prod}^p - \sum_P \sum_M \sum_I \sum_T S_{pmikt} C_{pmi} \\
 & - \sum_P \sum_I \sum_J \sum_T \sum_K W_{pijtk} C_{pij} - \sum_I X_i C_F - \sum_I Z_i C_Z \\
 & - \sum_P \sum_I \sum_T \sum_K C_{lp} I_{pitk}
 \end{aligned} \tag{1}$$

El cual es un modelo entero – mixto no lineal (denominado como MINL), sujeto a las siguientes restricciones presentadas en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1 Restricciones de la formulación inicial

$A_{im} \leq (X_i + Z_i)$	(2)	$\forall m \in M, i \in I$	Asigna la producción del proveedor m a la instalación i solo si ésta es abierta
$Y_{ij} \leq (X_i + Z_i)$	(3)	$\forall i \in I, j \in J$	Asigna al cliente j a la instalación i solo si ésta es abierta
$(X_i + Z_i) \leq 1$	(4)	$\forall i \in I$	Indica que a lo sumo puede abrirse un tipo de instalación en i
$I_{pit} \leq CAP_r(X_i + Z_i)$	(5)	$\forall p \in P, r \in R, i \in I, t \in \{1, \dots, T\}$	Hace que el inventario de los productos en i en el período t siempre sea menor que la capacidad de la instalación de tipo r si ésta existe
$I_{pit} = \sum_K I_{pitk}$	(6)	$\forall p \in P, i \in I, t \in \{1, \dots, T, k \in \{1, \dots, K\}\}$	El inventario en la locación i en el período t es igual a la suma del inventario de todos los productos con calidad k
$I_{pitk} = I_{pit-1,k-1}X_i + I_{pit-3,k-1}Z_i - W_{pijtk}$	(7)	$\forall p \in P, m \in M, i \in I, j \in J, k \in \{1, \dots, K\}, t \in \{1, \dots, T\}$	Balancea el inventario entre dos periodos: igual al inventario del período anterior, más la cantidad de producto que ha llegado, menos el flujo de productos salientes
$S_{pmityk} \leq CAP_r(X_i + Z_i)$	(8)	$\forall p \in P, r \in R, m \in M, i \in I, t \in \{1, \dots, T\}, k = 1$	Garantiza que la suma de productos enviados hacia una instalación i y el inventario existente para cada período, no exceda la capacidad de la instalación de tipo r
$W_{pijtk} \leq I_{pit-1k-1}$	(9)	$\forall p \in P, i \in I, j \in J, t \in \{1, \dots, T\}, k \in \{1, \dots, K\}$	La cantidad de producto p con calidad k vendido por la instalación i al cliente j en el período t es a lo sumo igual al inventario del producto p con calidad $k-1$ en la misma instalación i , del período anterior
$\sum_P \sum_I \sum_J \sum_T \sum_K W_{pijtk} \leq \sum_P \sum_J D_{pjt}$	(10)	$\forall p \in P, i \in I, j \in J, t \in \{1, \dots, T\}, k \in \{1, \dots, K\}$	La cantidad de producto p enviada de cada instalación i a cada vendedor j durante el horizonte de estudio debe ser menor o igual a la demanda del producto p para cada vendedor j . Esto indica que la demanda no necesariamente será satisfecha en su totalidad
$W_{pijtk} \leq CAP_r Y_{ij}$	(11)	$\forall p \in P, r \in R, i \in I, j \in J, t \in \{1, \dots, T\}$	Permite envíos de productos de la instalación i a la instalación j solo si j está asignada a i
$S_{pmityk} \leq CAP_r(A_{im})$	(12)	$\forall p \in P, r \in R, m \in M, i \in I, t \in \{1, \dots, T\}, k = 1$	Indica que se envía producto p producido por el proveedor m hacia la instalación i en el período t solo si ésta es abierta y la producción del proveedor le es asignada, y que dicho envío no sea superior a la capacidad

$Y_{ij}, A_{im}, X_i, Z_i \in \{0,1\}$	(13)	$\forall i \in I, j \in J$	Restringe las variables a valores binarios
$Q_{mpt}, I_{pit}, W_{pijtk}, S_{pmit0} \geq 0$	(14)	$\forall p \in P, m \in M, t \in T, i \in I, j \in J, t \in \{1, \dots, T\}, k \in \{1, \dots, K\}$	Restringe el nivel de inventario y cantidad de productos desperdiciados a valores no – negativos

4.2 Reformulación – Linealización del problema

En esta sección se reformula el modelo matemático de forma que puedan resolverse las no linealidades con expresiones equivalentes o aproximadamente equivalentes. Además, busca plantearse el modelo de una forma más general.

La ecuación (1) es una formulación no lineal debido a que los ingresos por venta de productos son representados por la cantidad de producto p con calidad k vendido al cliente j por parte de la instalación i en el período t , W_{pijtk} que es una variable de decisión entera, y las variables de decisión respecto al tipo de instalación ubicada en i , X_i y Z_i , que son variables binarias. Además, el término que representa el precio sigue la forma de una distribución de Weibull. Todos estos términos hacen que la función objetivo sea no lineal. Por otra parte, las restricciones (7) referentes al balance de inventario incluyen el producto de las variables $I_{pit-1,k-1}$ e $I_{pit-3,k-1}$ igualmente con las variables de decisión X_i y Z_i . De la misma forma, el producto de dos variables de decisión en esta restricción hace que el problema sea no lineal. A continuación, se presenta en la Tabla 4-2 un resumen de los nuevos parámetros y variables a incluir. Luego, se presentan las restricciones modificadas, restricciones adicionales, y por último la función objetivo. Todas estas modificaciones con el propósito de linealizar el problema.

Tabla 4-2 Parámetros y variables añadidos en la reformulación del problema

	Tipo	Descripción
X_{ir}	Variable de decisión. Indexada en r y en i	1 si la bodega de tipo r es ubicada en la locación i , 0 en otro caso.
C_r	Parámetro. Indexado en r	Costo de arriendo de la bodega tipo r
V_{pkr}	Parámetro. Indexado en p, k y r	Precio de venta del producto p con calidad k en la bodega de tipo r .
I_{pitk}^r	Variable. Indexada en p, i, t, k y r	Inventario de producto p en la bodega de tipo r en la locación i en el período t con calidad k
W_{pijtk}^r	Variable. Indexada en p, i, j, t, k y r	Cantidad de producto p con calidad k vendido de la bodega tipo r ubicada en i al cliente j , durante el período t .

S_{pmitk}^r	Variable. Indexada en r, p, m, i, t y k	Cantidad de producto p con calidad k enviada del proveedor m a la bodega de tipo r ubicada en i en el periodo t
C_{ipr}	Parámetro. Indexada en i, p y r	Costo de inventario por día del producto p en la bodega de tipo r ubicada en la locación i

Fuente: elaboración propia

4.2.1 Asignación de proveedores y clientes

Considerando la nueva variable de decisión X_{ir} , las asignaciones de proveedores y clientes son replanteadas. Un resumen y descripción de estas se presenta en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3 Nuevas restricciones de asignación y localización

$\sum_R X_{ir} \leq 1$	(15)	$\forall i \in I,$	Indica que en la locación i debe haber a lo sumo una bodega
$Y_{ij} \leq \sum_R X_{ir}$	(16)	$\forall i \in I, j \in J$	Asigna un cliente j a la bodega en la locación i , si y solo si hay una bodega en la locación i
$A_{im} \leq \sum_R X_{ir}$	(17)	$\forall i \in I, m \in M$	Asigna un proveedor m a la bodega en la locación i , si y solo si hay una bodega en la locación i

4.2.2 Precios

La reducción de la calidad puede reducir la aceptabilidad del producto para el consumidor (Qin et al., 2014) y disminuir la valoración del producto a través del tiempo (Chintapalli, 2014). Además, desde la perspectiva del vendedor, en ocasiones se utilizan estrategias de descuento cuando el producto pierde calidad o se acerca al límite de su vida útil, de modo que se incentive la demanda o consumo de los mismos y así evitar pérdidas mayores (A. K. Pal et al., 2006). En este trabajo se adopta el supuesto de que los precios de venta son *proporcionales* a la pérdida de calidad y que, por tanto, también siguen la estructura de una distribución de Weibull, con parámetros $\alpha_p, \beta_p, \lambda_p, \theta_p$, que están en función de la temperatura y del tipo de instalación (donde α_p y β_p están asociados a las bodegas regulares y λ_p y θ_p a las bodegas refrigeradas). El modelo propuesto a continuación no considera el tiempo *de forma continua*, en su lugar lo evalúa a intervalos discretos.

En esta investigación, la pérdida de calidad del producto se traduce en una disminución de su precio (como se menciona en la sección 4.1) y dicha disminución del precio se entiende como **depreciación** del producto. Así, la disminución del precio (depreciación)⁵ es un reflejo de la pérdida de calidad del producto. Para eliminar la no linealidad inherente a la formulación propuesta que sugiere una depreciación del producto

⁵ Hecha esta aclaración, el lector debe notar que los términos son usados indistintamente en este documento.

conforme a la pérdida de la calidad, se reformularán los precios como un único parámetro de valores discretos y constantes asociados a la degeneración que sufren los productos siguiendo la formulación inicial. La Figura 4-2 presenta la idea gráficamente: la pérdida de la calidad, que varía acorde al tipo de bodega y el tiempo (curva azul y curva gris) se puede representar en puntos discretos del tiempo con precios constantes (barras azules y barras grises).

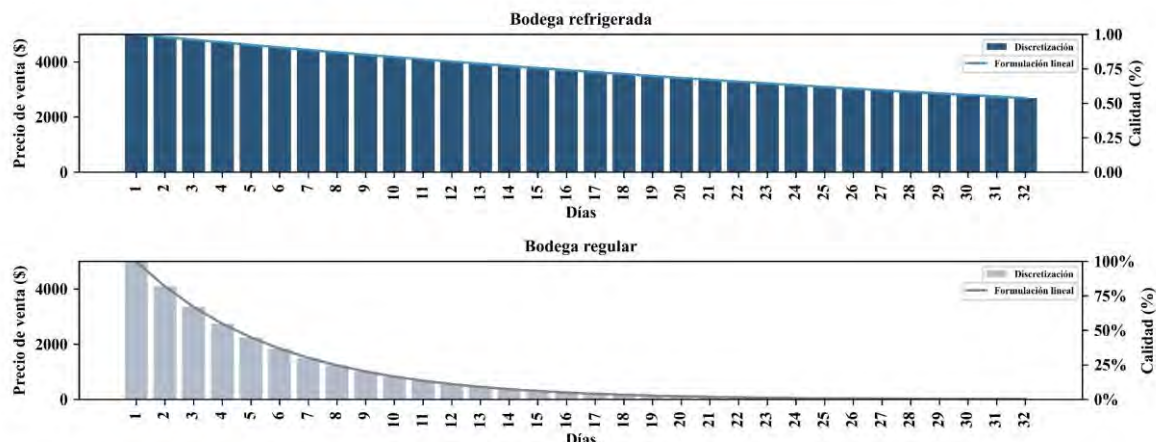


Figura 4-2 Discretización de precios acorde al tipo de bodega. Ejemplo de precio medio para guayaba común.
Fuente: elaboración propia

Al final, los precios de venta de los productos se reformulan como un nuevo parámetro V_{pkr} , que representa el precio de venta del producto p con calidad k en la instalación del tipo r . Este parámetro no solo sustituye los términos de la distribución de Weibull en (1), sino que permite darle mayor generalidad al problema: el conjunto contiene tantas calidades como el producto p pueda tener en la bodega tipo r que le proporcione mejores condiciones de preservación. Claramente, hay productos que se depreciarán antes (basta pensar en comparar cereales, que son *más duraderos*, con frutas, que perecen más rápido). A estos simplemente se les asigna un precio 0 después de la máxima calidad correspondiente. A manera de ilustración⁶, se puede ver la Tabla 4-4 a continuación:

Tabla 4-4 Esquema del nuevo parámetro de precios V_{pkr}

<i>Producto</i>	<i>Calidad</i>	<i>Tipo de bodega</i>	<i>Precio de venta</i>
1	1	1	100
1	2	1	50
1	3	1	30
1	4	1	5
2	1	1	100
2	2	1	40
2	3	1	8
2	4	1	0
...
P	K	R	V

Fuente: elaboración propia.

⁶ Los datos de esta tabla no son los utilizados en la modelación. Simplemente se utilizan para representar la idea discutida.

En la tabla anterior, se puede ver cómo el producto “2” tiene tantas calidades como el producto “1”, pero se deprecia completamente antes. Por ende, en la última calidad del producto “2” podemos ver un precio de venta 0.

4.2.2 Costos de inventario

Los costos de inventario se establecen como un porcentaje del precio nominal de venta de los productos. Debido a las capacidades de preservación de cada tipo de bodega, este precio nominal es distinto acorde a la bodega escogida (variable de decisión del modelo) y en consecuencia también lo es el costo de inventario. Por ello y para evitar no linealidades en la formulación (a causa de la multiplicación de variables de decisión) se opta por crear un nuevo parámetro C_{ipr} que representa los costos de inventario por día para cada tipo de producto p en cada tipo de bodega r

4.2.3 Compras y Ventas

La restricción (12) referente a los productos pedidos a los proveedores es replanteada para bodegas regulares y refrigeradas, como se ve en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5 Restricciones sobre pedidos a proveedores

$\sum_I \sum_R S_{pmitk}^r \leq Q_{mpt}$	(18)	$\forall p \in P, m \in M, t \in \{1, \dots, T\}, k = 1$	La cantidad de producto p que se envía del proveedor m a todas las bodegas i asignadas en el período t debe ser a lo sumo la cantidad producida por el proveedor m en ese período t
$Q_{mpt} \leq CapOferr_{mp}$	(19)	$\forall p \in P, m \in M, t \in \{1, \dots, T\}$	La oferta (cantidad de productos que pueden ofrecer los proveedores) está limitada acorde a su capacidad productiva
$S_{pmitk}^r \leq CAP_r A_{im}$	(20)	$\forall r \in R, p \in P, i \in I, m \in M, t \in \{1, \dots, T\}, k = 1$	Indica que se envía producto p producido por el proveedor m hacia la instalación i del tipo r en el período t solo si ésta es abierta y la producción del proveedor le es asignada, y que dicho envío no sea superior a la capacidad

Fuente: elaboración propia

El término de (1) asociado a los ingresos por venta de productos puede reformularse con ayuda del nuevo parámetro de precios:

$$\sum_P \sum_I \sum_J \sum_T \sum_K \sum_R W_{pijtk}^r V_{pkr}$$

Para mantener consistencia, la nueva variable X_{ir} cuenta con las restricciones mostradas en la Tabla 4-6

Tabla 4-6 Restricción de activación para ventas a clientes

$W_{pijtk}^r \leq BX_{ir}$	(21)	$\forall p \in P, i \in I, r \in R, j \in J, t \in \{1, \dots, T\}, k \in \{1, \dots, K\}$	La cantidad de producto p con calidad k vendida de la bodega de tipo r ubicada en i al cliente j en el período t , debe ser menor a una cantidad <i>muy grande</i> siempre que en i haya una bodega regular del tipo r
----------------------------	------	--	--

Fuente: elaboración propia

4.2.4 Inventario y demás restricciones

La variable I_{pitk} es reescrita como la variable I_{pitk}^r que permite representar la forma en la que los productos se deterioran (que a su vez depende del tipo de instalación que elija el modelo). Se añaden las restricciones (22) referentes al inventario de calidad máxima. Por otra parte, las restricciones (2) – (11), (13) y (14) son sustituidas por nuevas restricciones (15) – (30). Las nuevas restricciones pueden verse en la Tabla 4-5, la Tabla 4-6 y la Tabla 4-7.

Tabla 4-7 Otras restricciones de la reformulación del modelo

$I_{pitk}^r = \sum_M S_{pmitk}^r - \sum_J W_{pijtk}^r$	(22)	$\forall p \in P, i \in I, r \in R, t \in \{1, \dots, T\}, k = 1$	El inventario de producto p recibido con calidad máxima ($k = 1$) en la bodega de tipo r en la locación i en el período t , es igual a la cantidad de producto comprado p con calidad máxima que llega a dicha instalación en ese período, menos la cantidad de producto (también con calidad máxima) vendido a todos los clientes J
$I_{pitk}^r = I_{pit-1,k-1}^r - \sum_J W_{pijtk}^r$	(23)	$\forall p \in P, i \in I, r \in R, t \in \{2, \dots, T\}, k \in \{2, \dots, K\}$	Balancea el inventario entre dos períodos: igual al inventario del período anterior menos el flujo de productos vendidos
$I_{pit} = \sum_{k=1}^K I_{pitk}^r$	(24)	$\forall p \in P, i \in I, r \in R, t \in \{1, \dots, T\}$	El inventario total en la locación i en el período t es igual a la suma del inventario de todos los productos p con calidad k
$\sum_J W_{pijtk}^r \leq I_{pit-1,k-1}^r$	(25)	$\forall p \in P, i \in I, r \in R, t \in \{2, \dots, T\}, k \in \{2, \dots, K\}$	La cantidad de producto p con calidad k vendido desde la bodega en la locación i a todos los clientes J en el período t es a lo sumo igual al inventario del período anterior del producto p con calidad $k - 1$ en la misma instalación
$\sum_R W_{pijtk}^r \leq D_{pjt} Y_{ij}$	(26)	$\forall p \in P, i \in I, j \in J, t \in \{1, \dots, T\}, k \in \{1, \dots, K\}$	Permite envíos de productos de la instalación ubicada en i al cliente j , solo si la demanda D del cliente j está asignada a i
$\sum_R \sum_I \sum_K W_{pijtk}^r \leq D_{pjt}$	(27)	$\forall p \in P, j \in J, t \in \{1, \dots, T\}$	La cantidad de producto p enviada de todas las instalaciones i a cada cliente j durante el horizonte de estudio debe ser menor o igual a la demanda del producto p para cada cliente j . Esto indica que la demanda no necesariamente será satisfecha en su totalidad
$\sum_P \sum_K I_{pitk}^r \leq CAP_r X_{ir}$	(28)	$\forall r \in R, i \in I, t \in \{1, \dots, T\}$	Activa la variable de inventario I^r si y solo si existe una bodega de tipo r en la locación i

$Q_{mpt}, S_{pmitk}^r, I_{pitk}^r, I_{pit}, W_{pijtk}^r \geq 0$	(29)	$\forall m \in M, p \in P, i \in I, r \in R, j \in J, t \in \{1, \dots, T\}, k \in \{1, \dots, K\}$	Restringe la cantidad de producto <i>producido</i> , la cantidad enviada de proveedor a bodega, el nivel de inventario, y la cantidad de producto enviado de bodega a cliente, a valores positivos.
$X_{ir}, A_{im}, Y_{ij} \in \{1,0\}$	(30)	$\forall i \in I, m \in M, j \in J, r \in R$	Restringe las variables a valores binarios

Fuente: elaboración propia

Respecto a las restricciones de inventario es importante mencionar que las nuevas restricciones (23) llevan a una revisión del inventario cada 1 período, la cual es una estrategia de revisión más común y fácil de implementar (a nivel de programación).

Finalmente, la función objetivo original (1) pasa de ser un problema mixto entero – no lineal, a un problema mixto entero – lineal según:

$$\begin{aligned}
MAX \text{ } BT = & \sum_P \sum_I \sum_J \sum_T \sum_K \sum_R W_{pijtk}^r V_{pkr} - \sum_M \sum_P \sum_T Q_{mpt} C_{Prod}^p \\
& - \sum_P \sum_M \sum_I \sum_T \sum_R S_{pmitk}^r C_{pmi} - \sum_P \sum_I \sum_J \sum_T \sum_K \sum_R W_{pijtk}^r C_{pij} \\
& - \sum_I \sum_R X_{ir} C_r - \sum_P \sum_I \sum_T \sum_K \sum_R C_{ipr} I_{pitk}^r
\end{aligned} \quad (31)$$

Donde la función objetivo (31) está sujeta a las restricciones (15) – (30).

5 Caso de aplicación

Se desarrolló un caso de aplicación al departamento del Atlántico. Como parte del plan de desarrollo 2020 – 2023, el departamento busca realizar inversiones en infraestructura para impulsar el sector agrícola. Entre los indicadores para tal fin, se encuentra la construcción de un centro de acopio para la comercialización de productos y/o para la prestación de servicios de valor agregado (Gobernación del Atlántico, 2020, p. 207). Ello va en consonancia con indicadores y objetivos del Plan Integral De Desarrollo Agropecuario Y Rural Con Enfoque Territorial para el departamento (MINAGRICULTURA, 2019b).

De esta forma, el caso de aplicación buscó no solo utilizar datos del contexto local, sino implementar el modelo de optimización propuesto bajo diferentes escenarios de forma que los resultados sirvieran para dar una perspectiva sobre potenciales soluciones a las problemáticas logísticas, en congruencia con los objetivos del sector manifiestos por las entidades gubernamentales.

Las características del departamento en términos de producción agrícola, exportaciones, aspectos económicos y logísticos fueron expuestas en el capítulo 2. Para la estimación de los valores utilizados en los parámetros del modelo se buscó información de fuentes gubernamentales o publicaciones científicas, las cuales son detalladas en las subsecciones siguientes. En algunos casos y tal como se indicó al final de la sección 2.4, no se encontró información de referencia.

Para el caso de aplicación se realizaron las siguientes suposiciones adicionales:

- Se modelan dos horizontes de estudio que comprenden dos meses y tres meses, con 60 períodos y 90 períodos en cada caso (1 período = 1 día).
- Se modelan dos tipos de productos: *frutas*, y *verduras y hortalizas*, para lo cual la producción de cada producto es agregada en cada categoría.
- Se consideran dos tipos de bodegas: refrigeradas y regulares (i.e. no refrigeradas)
- Durante el horizonte de estudio los productos se encuentran en cosecha.
- Los proveedores pueden suministrar productos todos los días
- La cantidad de inventario inicial de las instalaciones es cero.
- El costo de inventario se establece como un 20% del precio de venta nominal.
- Para la calidad máxima ($k = 1$), las frutas se deprecian un 75% en bodegas regulares respecto al valor para el mismo producto en bodegas refrigeradas. Análogamente, la depreciación es del 80% en el caso de las verduras.

Además, se añadieron las restricciones (32), (33) y (34), que están descritas en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Restricciones del caso de aplicación

$I_{pitk}^r = 0$	(32)	$\forall p \in P, r \in R, i \in I, k \in \{2, \dots, K\}, t = 1$	Prohíbe el inventario de calidades diferentes a calidad 1 para el período 1
$W_{pijtk} \leq 0$	(33)	$\forall p \in P, i \in I, j = J, t = 1, k \in \{2, \dots, K\}$	Prohíbe el envío de productos con calidad dos o más a los clientes durante el primer período
$\sum_j W_{pijtk} \leq \sum_M S_{pmikt}$	(34)	$\forall p \in P, i \in I, t \in \{1, \dots, T\}, k \in \{1, \dots, K\}$	La cantidad de producto p con calidad k vendida de la bodega ubicada en i al cliente j en el período t , debe ser menor o igual a las compras realizadas a los proveedores

Fuente: elaboración propia

5.1 Oferta

El Ministerio de Agricultura a través del portal web *Agronet* (2019a) proporciona datos abiertos sobre el cultivo de numerosos productos agrícolas para casi cada municipio del país. Utilizando datos históricos entre 2007 y 2018, se estimó la producción media de frutas y verduras para cada municipio, tomando como referencia la clasificación de productos de la Tabla 2-2. Cabe destacar que los valores indicados en el portal Agronet son valores de producción anual. Para la evaluación de los distintos horizontes de diseño, se asumió que la producción media anual se da durante el horizonte de diseño.

Los 5 municipios más grandes (aquellos con área mayor a 200 Km²) fueron segmentados en 3 sub-áreas con el propósito de ejemplificar la diversidad de puntos de entrega de producto en municipios de gran extensión (un producto puede ser provisto o entregado en diferentes áreas). Los municipios afectados pueden verse en la Figura 5-1.



Figura 5-1 Proveedores de la red

Fuente: elaboración propia.

Para ello, se utilizó un procedimiento descrito en 5 pasos:

- i. Utilizando sistemas de información geográfica (SIG) se crearon puntos aleatorios dentro del polígono (municipio de interés).
- ii. Se aplicó un *cluster* por el método $k - medias$ a cada polígono.
- iii. Se agruparon los puntos según al *cluster* y luego se obtuvo el centroide de cada *cluster*.
- iv. Luego, se usaron polígonos de Voronoi con *buffer* suficiente, de modo que se cubriera toda el área del municipio.
- v. Se crearon líneas a partir de los polígonos de Voronoi
- vi. Finalmente, uniendo las capas de líneas y los polígonos originales, se obtuvo la división deseada.

El método implementado permite obtener polígonos (las divisiones del municipio) de área aproximadamente igual. Los municipios a los cuales se aplicó el procedimiento descrito son: Sabanalarga, Luruaco, Manatí, Ponedera y Piojó.

La producción de estas subáreas se asignó teniendo en cuenta la producción del municipio y la proporción del área del segmento respecto al área original, siguiendo una interpolación lineal

5.2 Demanda

En lo referente al consumo de frutas y verduras, la Encuesta Nacional de Situación Nutricional (2005) estima un consumo de frutas y verduras para los departamentos del territorio nacional, desagregando dicho consumo acorde a niveles del SISBÉN, ubicación (zona urbana o zona rural) y género. Aquí, se asumió que el consumo de frutas y verduras es el mismo para todos los municipios del departamento, y se utilizó el consumo por género para la estimación de la demanda. El detalle de consumo para los potenciales clientes se puede ver en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2 Consumo de frutas (g/día) para algunas de los puntos de demanda

	Santa Marta	Cartagena	Riohacha	Valledupar	Barranquilla
Hombre	113,3	156,9	109,5	117,1	72,6
Mujer	124	154,3	107,4	124,7	72,2

Fuente: ENSIN (2005) con modificaciones

Así, utilizando datos de población al año 2018 provistos por el portal TerriData (Departamento Nacional de Planeación, 2020b) se obtuvo un estimado del consumo de frutas y verduras para cada cliente. Aplicando las equivalencias correspondientes, se tradujo la demanda a toneladas por día.

Es importante mencionar que para el diseño de la red, se consideraron 6 clientes. Cuatro de ellos ubicados en Barranquilla, que representan los dos grandes mercados (Barranquillita y Granabastos) y 2 puntos adicionales en la ciudad. Los dos puntos de demanda restantes son puntos de referencia en los límites del departamento que capturan la demanda de Riohacha, Santa Marta y Valledupar (*Ref 1*), y Cartagena (*Ref 2*).

5.3 Costos de transporte

Tal como se indicó anteriormente, ni el Ministerio de Transporte en la herramienta SICE – TAC ni la gobernación del departamento brindan reportes o herramientas para determinar el costo de transporte de los productos agrícolas desde los proveedores (campesinos) hacia los destinos finales. Por ende, se asumió un costo representativo de \$700 ton – km de los proveedores a las bodegas, y un costo de \$500 ton – km de las bodegas a los clientes. Haciendo uso de Sistemas de Información Geográfica y Google Earth se determinó la distancia entre los diferentes pares origen – destino, tal que el costo quedara en términos de pesos por tonelada (\$/ton). Se asumió además que el costo de transporte es el mismo para los dos tipos de productos tratados en el caso de aplicación.

Además, se incluyó el costo de las externalidades del transporte. Márquez & Cantillo, (2013) realizaron una estimación de los costos de externalidades por transporte de carga para los principales corredores logísticos de Colombia. Sus resultados indican que dicho costo para el modo carretero es de aproximadamente 0,0014 dólares por tonelada kilómetro (USD/ton – km). Se utilizó esta estimación, con las conversiones apropiadas, haciendo la salvedad

de aplicar un costo diferente entre los arcos proveedor – bodega y bodega – cliente, siendo más alto en el primer caso debido al en general pobre estado de las vías terciarias y diferente tipo de vehículo utilizado (más pequeño).

5.4 Precio de venta y costos de inventario

Para la estimación del precio de venta de los productos se utilizó información del Sistema de Información de Precios – SIPSA (DANE, n.d.), en el cual se publican boletines periódicos sobre los precios de venta de decenas de productos agrícolas en las principales centrales de abasto y mercados del país. Se utilizaron datos de informes semanales, desde la semana del 29 de diciembre de 2018 al 4 de enero de 2019, hasta la semana del 25 de abril de 2020 al 30 de abril de 2020. Del mismo modo que con la oferta, se utilizó la clasificación de la Tabla 2-2 para estimar un valor medio de venta por kilogramo de frutas y verduras.

Los precios medios por categoría de producto se presentan en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Precio medio (\$/Ton) por categoría de producto, acorde al tipo de bodega

Producto	Regular	Refrigerada
Frutas	\$1.427.250	\$1.903.000
Verduras	\$1.063.000	\$1.328.800

Fuente: elaboración propia

Para el caso de aplicación, se trabajó con el parámetro de precios V_{pkr} descrito en la sección 4.2.2. Los costos de inventario para el caso de aplicación se muestran en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4 Costos de inventario (\$/Ton/día) para el caso de aplicación

Producto	Regular	Refrigerada
Frutas	\$285.500	\$380.600
Verduras	\$212.600	\$265.800

Fuente: elaboración propia

En la evaluación de los escenarios, se extendió la concepción inicial (ver 4.2.2.) y se consideraron precios que decrecían de forma lineal y no lineal, con variaciones de precio dependiendo del tipo de producto y del tipo de bodega. El caso de depreciación lineal es similar al enfoque usado por Ge et al., (2018) quienes utilizan una tasa fija de “disminución” de la carga por milla de impedancia transportada.

La Tabla 5-5 ilustra, para uno de los productos, los precios que siguen la forma no lineal ⁷:

⁷ Dado el tamaño de las tablas, solo se muestra la variación de precios – lineales y no lineales – para uno solo de los productos (frutas).

Tabla 5-5 Precios no lineales para frutas. Caso de aplicación.

R	P	K	V_{pk} (\$/ton)
Regular	frutas	1	\$1.427.250
Refrigerada	frutas	1	\$1.903.000
Regular	frutas	2	\$856.400
Refrigerada	frutas	2	\$1.522.400
Regular	frutas	3	\$513.800
Refrigerada	frutas	3	\$1.217.900
Regular	frutas	4	\$308.300
Refrigerada	frutas	4	\$974.300
Regular	frutas	5	\$185.000
Refrigerada	frutas	5	\$779.400
Regular	frutas	6	\$111.000
Refrigerada	frutas	6	\$623.500
Regular	frutas	7	\$66.600
Refrigerada	frutas	7	\$498.800
Regular	frutas	8	\$40.000
Refrigerada	frutas	8	\$399.000

Fuente: elaboración propia

De manera gráfica, puede verse cómo se formula que los precios siguen una forma no lineal, aproximándose a una distribución exponencial. Ésta es un caso especial de la distribución de Weibull con parámetro de forma igual a 1. El gráfico correspondiente para la Tabla 5-5 puede verse en la Figura 5-2.

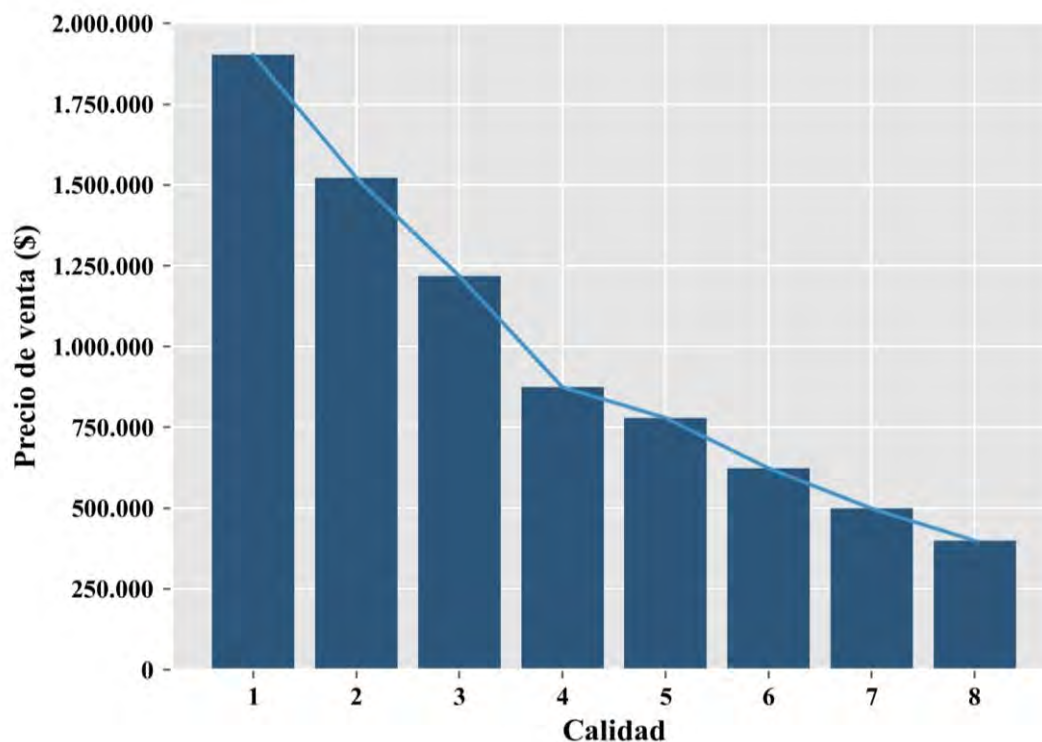


Figura 5-2 Precios no lineales para frutas, bodega refrigerada. Caso de aplicación.
Fuente: elaboración propia

Igualmente, los precios que siguen una forma lineal se muestran en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6 Precios lineales para frutas. Caso de aplicación

R	P	K	V _{pk} (\$/ton)
Regular	frutas	1	1.427.250
Refrigerada	frutas	1	1.903.000
Regular	frutas	2	1.141.800
Refrigerada	frutas	2	1.712.700
Regular	frutas	3	856.400
Refrigerada	frutas	3	1.522.400
Regular	frutas	4	570.900
Refrigerada	frutas	4	1.332.100
Regular	frutas	5	285.500
Refrigerada	frutas	5	1.141.800
Regular	frutas	6	0
Refrigerada	frutas	6	951.500
Regular	frutas	7	0
Refrigerada	frutas	7	761.200
Regular	frutas	8	0
Refrigerada	frutas	8	570.900

Fuente: elaboración propia

La variación de los precios puede verse gráficamente en la Figura 5-3.

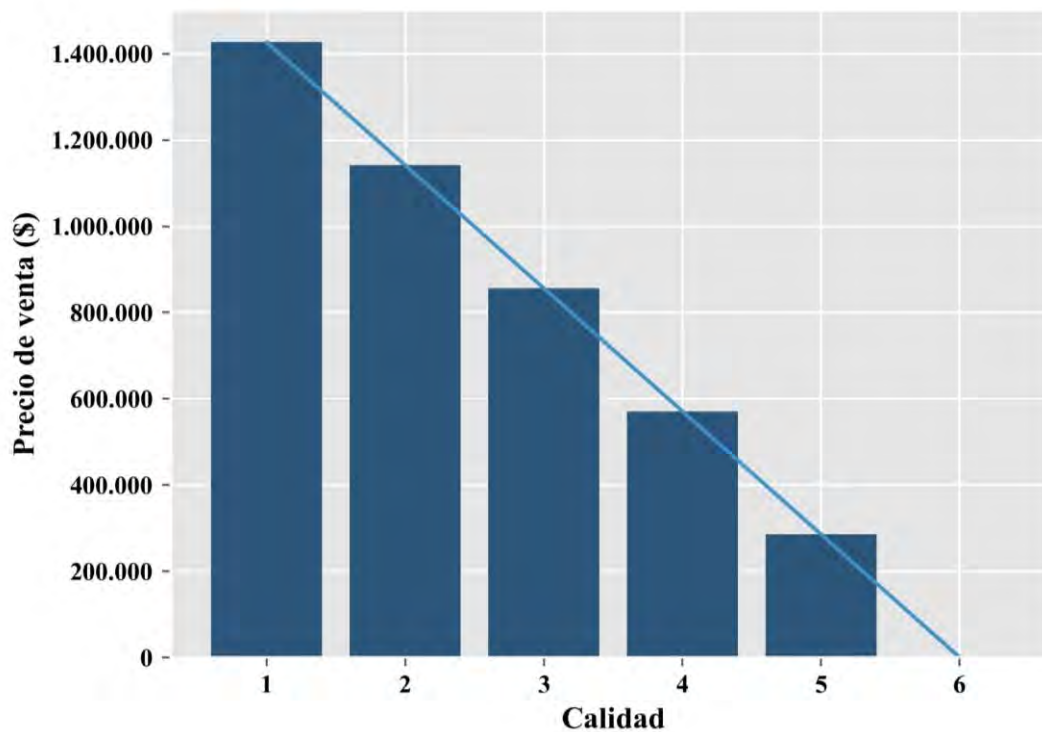


Figura 5-3 Precios lineales para frutas, bodega regular. Caso de aplicación.

Fuente: elaboración propia

Una suposición adicional hecha para el caso de estudio es que si bien las operaciones logísticas para llevar el producto del proveedor al cliente tardan menos de un período, mientras que el producto ingresa a bodega y ocurren todas las operaciones del caso (verificación, descarga, almacenamiento temporal, *embalaje*, etc.), existe una depreciación inherente. Es decir, aunque un producto sea recibido y entregado en calidad máxima (“1”), hay una pérdida de calidad. Para incluir esto en el modelo, se asignó un precio en calidad máxima menor en las bodegas regulares que en las bodegas refrigeradas.

5.5 Capacidad de las instalaciones y costos de arriendo

En el caso de estudio se consideraron dos tipos de instalaciones: bodegas refrigeradas y bodegas regulares. Las capacidades de las bodegas son diferentes. Se tomó como referencia la relación capacidad – área de bodega indicada por el DANE, (2012) en su informe *Características de las instalaciones y el abastecimiento en Corabastos*. En el documento, se mencionan bodegas de Corabastos con un área de 400 m² y capacidad de almacenamiento de 100 toneladas. Se tomó esa referencia para las bodegas refrigeradas. Por su parte, para las bodegas regulares se tomó un área mayor (500 m²) y una capacidad igualmente mayor (125 toneladas).

A diferencia de muchos modelos de localización, el presente trabajo incluye costos de arriendo de instalaciones en lugar de costos de construcción. Para los gastos de arriendo, se tomó como referencia el valor mínimo de arriendo por metro cuadrado en

GRANABASTOS, proporcionado por personal de la entidad. El valor de arriendo utilizado fue de \$14.000/m². Esto permite utilizar un valor real y apropiado al contexto del Atlántico.

También se consideraron gastos de personal administrativo, ayudantes de bodega, gastos de servicios públicos y gastos de vigilancia. El detalle de estos gastos no es presentado por brevedad. Un aspecto importante por notar es que la diferencia de costos debido al mayor consumo de energía eléctrica en bodegas refrigeradas está implícita en el costo de bodega utilizado en el modelo.

El costo de arriendo por bodega se tomó como un costo mensual. A manera de evitar indexar este costo por períodos y generar parámetros adicionales, simplemente se multiplicó previamente el número de meses en la modelación por el costo total de arriendo mensual, y se indicó este costo como un *input* del modelo. Los costos totales de arriendo por tipo de bodega y período de análisis se muestran en la Tabla 5-7 debajo.

Tabla 5-7 Costos de arriendo de bodegas

Períodos	Bodega regular	Bodega refrigerada
60	\$68.290.000	\$98.210.000
90	\$102.435.000	\$147.315.000

Fuente: elaboración propia

5.6 Costos de producción

Para los costos de producción se utilizó información del segundo informe de costos de producción *Evaluaciones Agropecuarias del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural* (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural & Universidad Sergio Arboleda, 2018), que proporciona costos de producción por hectárea con y sin administración para numerosos productos. Utilizando la información histórica de rendimiento por hectárea del portal Agronet, se obtuvo un promedio de costos de producción por tonelada de frutas y verduras producidas. La relación puede verse en la Tabla 5-8

Tabla 5-8 Costos de producción por tonelada

Producto	Costos de producción (\$/Ton)
Frutas	587.833
Verduras	775.200

Fuente: elaboración propia

Del informe se tomaron los costos con administración y se realizó el promedio arriba detallado.

5.7 Escenarios de modelación

Para la modelación del caso de estudio, se consideraron variaciones en los parámetros con potencial incidencia sobre los resultados del modelo. Dichos parámetros son descritos como *factores*, y se muestran en detalle en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9 Factores considerados para los escenarios de modelación

Factor	Niveles	Detalle Niveles
Oferta	2	Creciente, Rampa
Demanda	2	Creciente, Rampa
Horizonte de estudio (períodos)	2	60, 90
Carácter de la oferta	2	Disponible en todo el horizonte, Parcialmente disponible en todo el horizonte
Depreciación de productos	2	Lineal, No lineal
Tarifa de transporte	2	Bajo, Alto

Fuente: elaboración propia

Con todas las posibles combinaciones de los parámetros, en total se tienen 64 escenarios de modelación, los cuales fueron modelados para el caso de estudio, los cuales pueden verse en el Apéndice A.

El problema fue codificado en AMPL y resuelto con el solver CPLEX 20.1.0.0, en un computador portátil con procesador Intel ® Core (TM) i5-4210U (CPU @ 1.70GHz – 2.40 GHz) y 8 GB de memoria RAM.

6 Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los principales resultados de los escenarios modelados. Además, se presentan análisis de modelos de benchmarking, utilizados para comparar los resultados obtenidos. Las comparaciones son realizadas *ceteris paribus* de modo que se pueda identificar claramente el impacto de los parámetros sobre las decisiones del modelo.

Dados los numerosos escenarios de modelación, por sección solo se mostrarán los resultados respectivos de algunos de los escenarios.

6.1 El máximo beneficio: función objetivo

El objetivo del modelo de optimización y la cadena de suministro propuesta es maximizar el beneficio. Los múltiples escenarios de modelación arrojan diferentes resultados. Organizando los resultados en orden descendente de la función objetivo, al tomar los cuatro primeros resultados, se obtienen los cuatro escenarios que brindan mayor beneficio. Esto puede verse en la Figura 6-1.

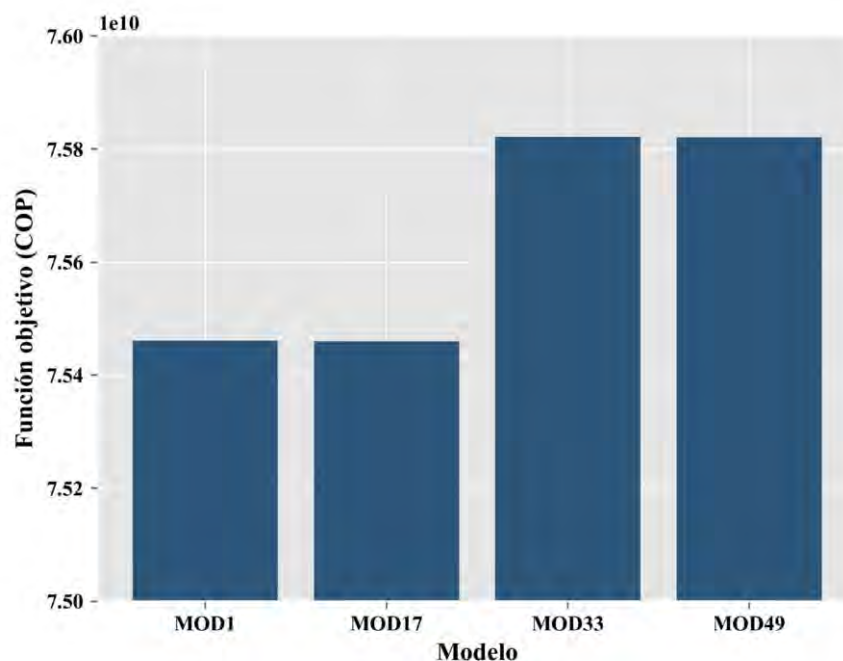


Figura 6-1 Escenarios con función objetivo más alta
Fuente: elaboración propia

Al inspeccionar los resultados, es interesante ver que existe una relación entre ellos, ya que comparten características en los parámetros de modelación: todos los escenarios corresponden al mismo horizonte (60 períodos), misma forma de la oferta (creciente), misma forma de la demanda (creciente), y mismo carácter de la oferta (disponible en todo el horizonte). Los escenarios 1 y 17 tienen tarifas de transporte altas, con depreciación lineal y

no lineal respectivamente. Por su parte, los escenarios 33 y 49 tienen tarifas de transporte bajas, con depreciación lineal y no lineal respectivamente.

Los escenarios comparten además otra particularidad: en todos los casos los costos de inventario son bajos. Tomando en consideración las características de las curvas de oferta y demanda, el carácter de la oferta y los costos de inventario es posible inferir que para los escenarios de mayor beneficio el sistema se comporta como un *crossdocking*. Esto es lógico, ya que en la medida que en la medida que aumenta la oferta, también lo hace la demanda, siguiendo además un mismo tipo de curva. Adicionalmente, dado que no existe ningún desfase temporal entre la oferta y la demanda, no existe alguna razón para que el sistema almacene grandes cantidades de productos si durante el horizonte es capaz de satisfacerla.

Estos escenarios de modelación ejemplifican una condición de mercado en la cual la demanda de un producto es elástica a la oferta. Es decir, aquellos casos en los cuales, a mayor cantidad de producto disponible, mayor cantidad de producto demandado.

Debe aclararse, sin embargo, que en el presente trabajo la demanda de un producto p no es una función de su precio (que como ya se ha mencionado, varía acorde a la calidad de este), sino que es conocida de antemano.

6.2 Costos globales

El análisis de costos es un aspecto importante en el diseño de cadenas de suministro, así como en el análisis de su desempeño. La Figura 6-2 presenta la distribución porcentual de los costos globales promedio para todos los escenarios modelados en el sistema propuesto.

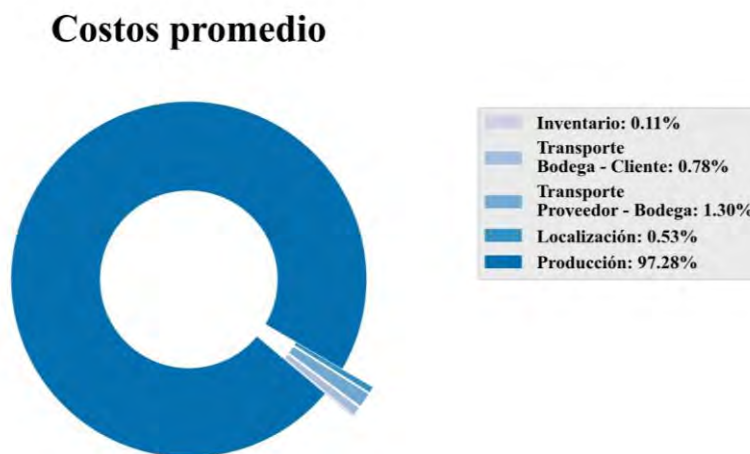


Figura 6-2 Distribución de costos globales promedio - con costos de producción
Fuente: elaboración propia

La Figura 6-2 deja de manifiesto la preponderancia que tienen los costos de producción sobre los demás costos de la cadena. En promedio, representan el 97.28% de los costos totales. A modo de tener una perspectiva más clara del papel que tienen los costos de

transporte, inventario e instalación, la Figura 6-3 presenta la misma distribución porcentual de costos, si se excluyen los costos de producción.

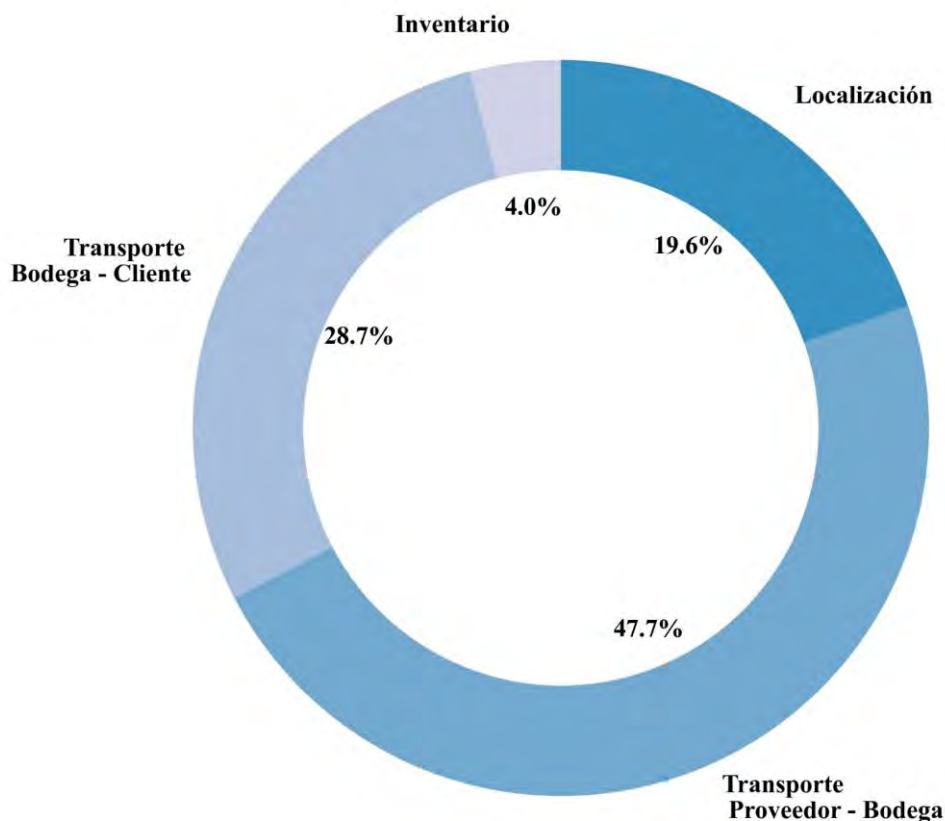


Figura 6-3 Distribución de costos globales promedio - sin costos de producción
Fuente: elaboración propia

Puede notarse que los costos de transporte en conjunto representan aproximadamente el 77% de los costos totales bajo este análisis. Por su parte, los costos de arriendo de instalaciones ocupan el 19% de los costos totales, mientras que los costos de inventario el 4%.

De lo anterior, puede notarse el gran efecto de los costos de producción para la cadena. Existe pues una oportunidad de mejora en el primer escalón de la cadena: la producción. En la medida que los costos de producción se vean reducidos, el beneficio percibido podría incrementar.

Desde una perspectiva *social* en la que se considera a cada agente de la cadena, especialmente a los pequeños productores del departamento, se hace necesario encontrar maneras de reducir los costos de producción de modo que éstos perciban un beneficio suficiente para cubrir los gastos asociados a los cultivos y tener utilidades significativas. Es posible que esta reducción se haga por medio de intervención estatal, tales como subsidios destinados a maquinaria, semillas, abono o materiales relacionados que permitan

producciones más eficientes. La identificación de la estrategia apropiada para alcanzar dicho fin está por fuera del alcance del presente proyecto.

Por otro lado, si el modelo propuesto decide ser implementado, bajo la perspectiva *privada* de un administrador de la cadena los costos de producción pierden relevancia pues él no incurre en ellos. Este ente de la cadena se fijaría más en la distribución porcentual de la Figura 6-3 y entendería que en general, los costos de transporte son los que tienen mayor peso en el funcionamiento de la cadena de abastecimiento.

6.3 Configuración de la red

Para cada escenario de modelación existe una configuración de la red. No obstante, existen algunas configuraciones que se presentan con frecuencia. En este numeral, se presentan las dos más frecuentes, en la Figura 6-4 y la Figura 6-5.

En la mayoría de los escenarios, el modelo eligió ubicar dos instalaciones en los municipios de Luruaco y Malambo, como puede apreciarse en la Figura 6-4. Este resultado se explica si se considera que Luruaco es uno de los municipios con mayor capacidad productiva en el departamento. Específicamente, su producción puede representar aproximadamente el 11% del total de verduras y el 7% del total de frutas que puede producir el Atlántico. Además, está cerca de Repelón, cuya capacidad puede representar el 18% del total de verduras y el 12% del total de frutas.

En el caso de Malambo ocurre algo similar, ya que la capacidad del municipio puede constituir el 13% y el 12% del total de verduras y frutas. En su caso, está cerca de otro municipio con gran capacidad, Ponedera, que puede aportar el 11% de las verduras y el 12% de las frutas producidas.

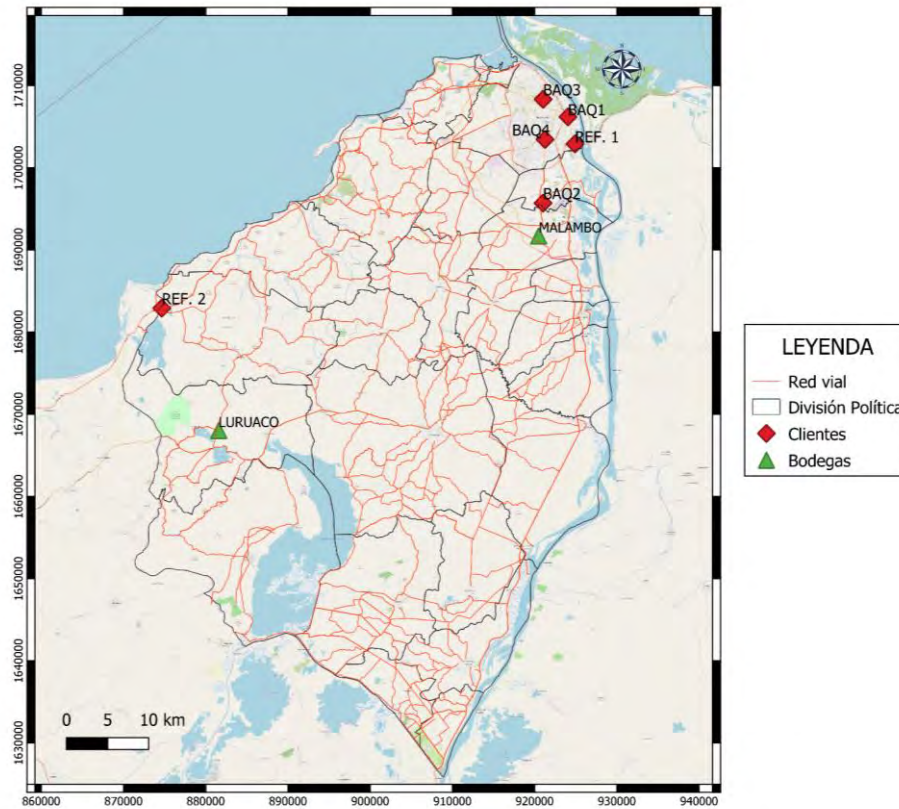


Figura 6-4 Configuraciones frecuentes de la red – ejemplo 1

Fuente: elaboración propia

En otros casos, el modelo eligió ubicar una bodega adicional en Galapa. Aunque Galapa no es un gran productor (aproximadamente el 2% del total de verduras y el 1.8% del total de frutas), sí se encuentra cerca de un municipio importante en ese rubro, como lo es Tubará.

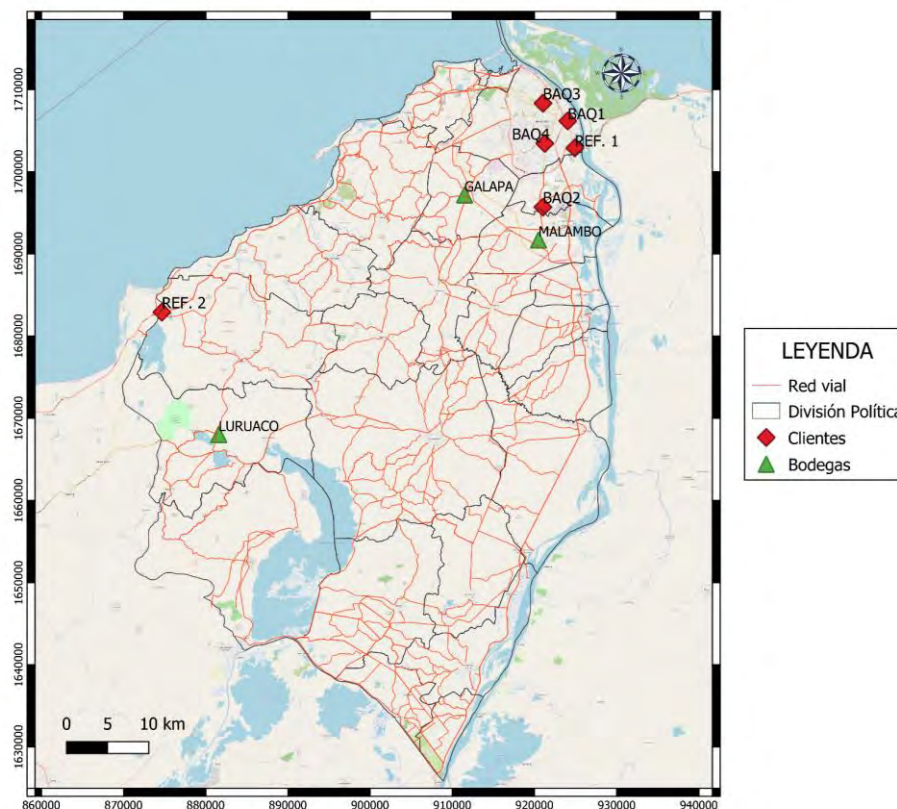


Figura 6-5 Configuraciones frecuentes de la red – ejemplo 2

Fuente: elaboración propia

Debe mencionarse que en todos los casos, todos los municipios fueron utilizados como proveedores de la red. Bajo la configuración de dos bodegas, todos los municipios proveen a las bodegas seleccionadas en Luruaco y Malambo. Sin embargo, para configuraciones como las de la Figura 6-5 y aquellas con más instalaciones, la asignación de proveedores a bodegas es distinta.

Por otra parte, todos los clientes fueron asignados a todas las bodegas. La similitud en órdenes de magnitud de la oferta y la demanda total (es decir, en todo el horizonte de análisis) revelan por qué el sistema conecta a todos los proveedores con todas las bodegas y todos los clientes: el modelo busca aprovechar al máximo la oferta disponible para satisfacer la demanda.

Más allá de la particularidad en las decisiones que toma el modelo en cada escenario de modelación, de estas elecciones presentadas en reiteradas oportunidades pueden identificarse patrones que ayudan a explicar el *razonamiento del modelo* tras ellas. Por ejemplo, si se toma en consideración que los costos de transporte entre proveedores y bodegas son más altos que los costos de transporte entre bodegas y clientes, es lógico pensar que el sistema preferirá ubicar instalaciones cerca de los grandes proveedores.

De esta forma, grandes cantidades de producto son transportadas una menor distancia entre proveedores y bodegas, pues los proveedores más importantes están cerca a éstas.

Es relevante mencionar que en todos los escenarios el modelo prefirió utilizar bodegas refrigeradas.

6.4 Costos de inventario vs depreciación de los productos

La Tabla 6-1 presenta el efecto de la depreciación de los productos sobre los costos de inventario. Se presentan dos ejemplos: uno de ellos, el de los escenarios 4 y 20, y otro, el de los escenarios 12 y 28. Ambas comparaciones corresponden a escenarios análogos en los cuales lo único que varía es la depreciación de los productos.

Tabla 6-1 Impacto de depreciación sobre los costos de inventario

Escenario	Oferta	Demanda	Horizonte	Carácter de Oferta	Depreciación	Tarifa de Transporte	Costos de Inventario
4	Rampa	Rampa	60	Disponible en todo el horizonte	Lineal	Alta	\$12.179.200
20	Rampa	Rampa	60	Disponible en todo el horizonte	No Lineal	Alta	\$761.200
12	Rampa	Rampa	60	Parcialmente disponible en el horizonte	Lineal	Alta	\$126.430.000
28	Rampa	Rampa	60	Parcialmente disponible en el horizonte	No Lineal	Alta	\$108.922.000

Fuente: elaboración propia

Los resultados muestran que, independientemente del carácter de la oferta, existe un claro efecto de la depreciación sobre los costos de inventario. Cuando la depreciación es *lineal*, los costos de inventario son mayores que cuando es *no lineal*. Con depreciación lineal, el modelo puede almacenar productos por más tiempo ya que estos siguen brindando un margen de ganancia importante. Esto se puede constatar por lo mostrado en la Figura 6-6, que corresponde a los escenarios 4 (barras azules) y 20 (barra gris).

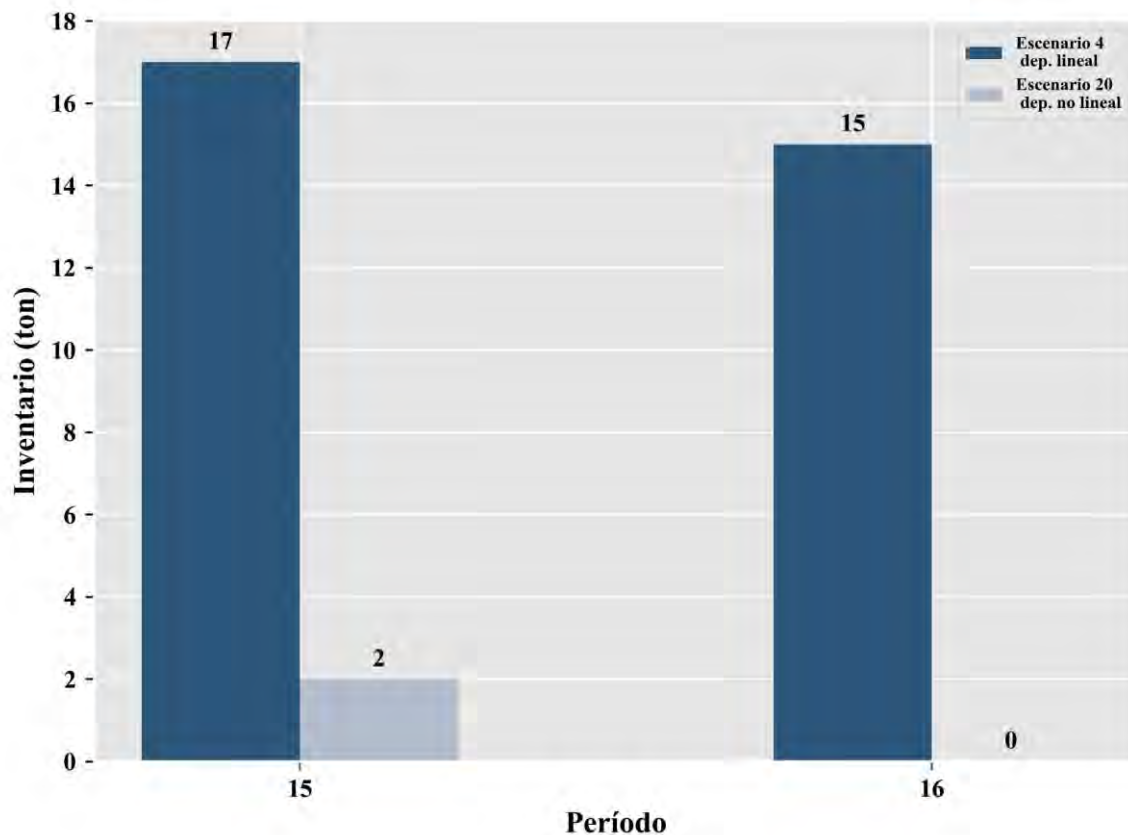


Figura 6-6 Efecto de la depreciación sobre los niveles de inventario a través del tiempo

Fuente: elaboración propia

Como puede verse, el nivel de inventario total es mucho mayor para el caso de depreciación lineal, y lo mantiene durante un período más que su contraparte.

La depreciación no lineal es mucho más agresiva, y representa aquellos productos que son altamente sensibles a las condiciones ambientales en que se encuentren. Estos productos, al perecer más rápido, pierden valor vertiginosamente (este comportamiento puede presentarse en algunas frutas como las fresas y uvas). Bajo tales condiciones de depreciación, es claro que el modelo encuentra mucho más atractivo mantener bajos niveles de inventario. Esto le permite entregar productos con la mayor calidad posible, lo cual representa un mayor beneficio.

En el caso de oferta parcialmente disponible en el horizonte de análisis (escenarios 12 y 28), la depreciación lineal sigue permitiendo que el modelo preserve mayores niveles de inventario. No obstante, la diferencia respecto a la depreciación no lineal es mucho menor en órdenes de magnitud respecto a la primera comparación mostrada entre los escenarios 4 y 20. La Figura 6-7 permite explicar la causa de este comportamiento.

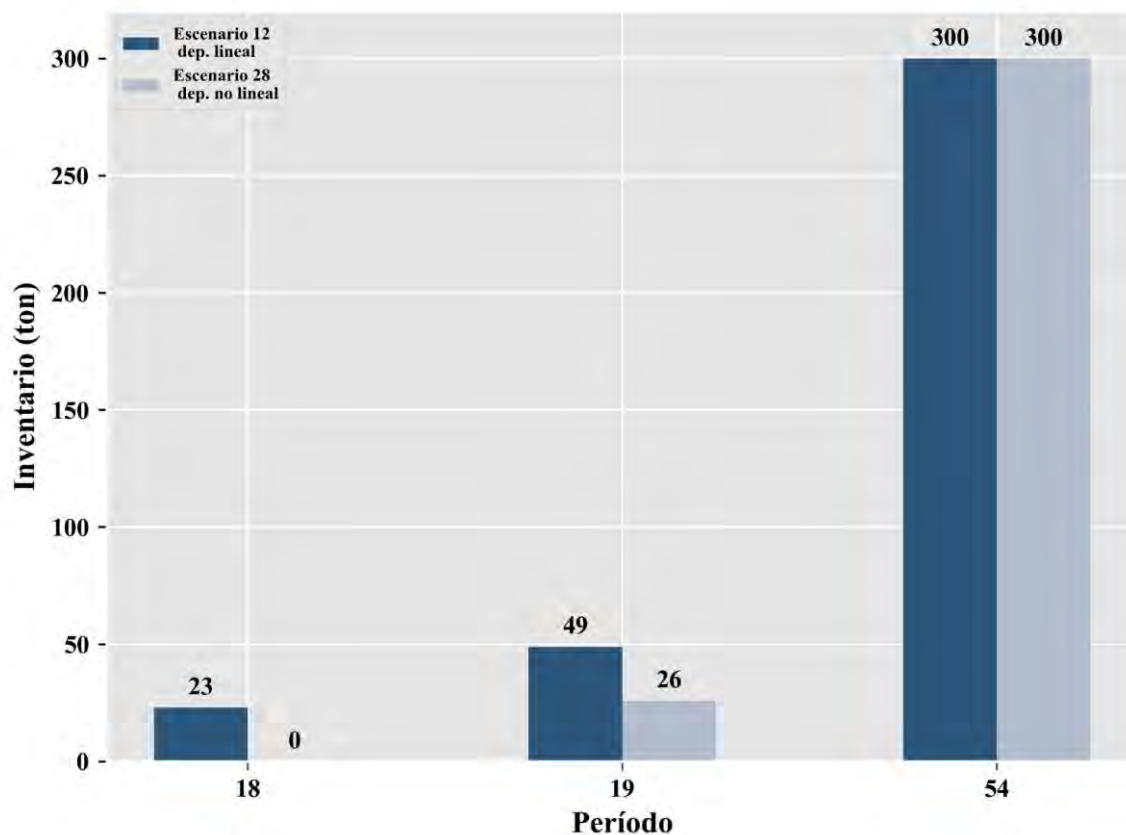


Figura 6-7 Efecto de la depreciación sobre los niveles de inventario a través del tiempo - escenarios con oferta parcialmente disponible

Fuente: elaboración propia

Puede apreciarse que, bajo estas condiciones, durante los primeros períodos (ascenso de la rampa), el modelo conserva mayores niveles de inventario para la depreciación lineal que para la depreciación no lineal. Luego, en el período 54, se presenta una particularidad: para ambos casos el modelo mantiene el mismo nivel de inventario (300 toneladas). Esto sucede debido a que a partir de ese período no hay más oferta de productos y el modelo procura satisfacer la mayor cantidad de demanda posible para maximizar el beneficio.

En estos escenarios, la red tiene 3 bodegas de almacenamiento. Es fácil notar que el modelo decide copar la capacidad de almacenamiento de la red (cada instalación refrigerada tiene una capacidad máxima de 100 toneladas) en aras de distribuir productos en el período siguiente. Por ende, puede inferirse que en este caso la incidencia de la depreciación sobre los niveles de inventario es considerablemente menor, ya que la decisión sobre el almacenamiento de productos en bodega está determinada más bien por el desfase temporal entre oferta y demanda.

6.5 Número de instalaciones vs tarifa de transporte

En esta sección se presenta el impacto de las tarifas de transporte sobre el número de instalaciones. Como puede verse en la Tabla 6-2, realizando comparaciones, *ceteris paribus*, es evidente que cuando la tarifa de transporte es alta, el modelo tiende a ubicar una instalación más que cuando la tarifa es baja.

Tabla 6-2 Efecto de la tarifa de transporte en el número de instalaciones

Escenario	Oferta	Demanda	Horizonte	Carácter de Oferta	Depreciación	Tarifa de Transporte	Número de instalaciones
4	Rampa	Rampa	60	Disponible en todo el horizonte	Lineal	Alta	3
20	Rampa	Rampa	60	Disponible en todo el horizonte	Lineal	Baja	2
36	Rampa	Rampa	60	Disponible en todo el horizonte	No lineal	Alta	3
52	Rampa	Rampa	60	Disponible en todo el horizonte	No lineal	Baja	2

Fuente: elaboración propia

Esto ocurre porque el modelo busca disminuir los costos de transporte bajo esta condición. Al ubicar una instalación más, es posible que se reduzca el total de kilómetros recorridos en el proceso de distribución de productos, reduciendo consecuentemente el total de costos de transporte.

Es interesante notar, sin embargo, que el impacto de la tarifa de transporte no es el mismo para el caso de una oferta que no está disponible en todo el horizonte de estudio. De hecho, como puede apreciarse en la Tabla 6-3 debajo, en el caso de oferta parcialmente disponible en el horizonte de análisis siempre se eligen 3 instalaciones, independientemente de la tarifa de transporte.

Tabla 6-3 Efecto de la tarifa de transporte en el número de instalaciones - caso de oferta parcialmente disponible

Escenario	Oferta	Demanda	Horizonte	Carácter de Oferta	Depreciación	Tarifa de Transporte	Número de instalaciones
12	Rampa	Rampa	60	Parcialmente disponible en el horizonte	Lineal	Alta	3
28	Rampa	Rampa	60	Parcialmente disponible en el horizonte	Lineal	Baja	3
44	Rampa	Rampa	60	Parcialmente disponible en el horizonte	No lineal	Alta	3
60	Rampa	Rampa	60	Parcialmente disponible en el horizonte	No lineal	Baja	3

Fuente: elaboración propia

Esto puede explicarse considerando que, en estos escenarios, la decisión del modelo respecto al número de instalaciones a ubicar está determinada por los niveles de inventario más que por los costos de transporte. Una instalación más permite que el sistema tenga mayor capacidad de almacenamiento.

6.6 Modelos Benchmark

El modelo propuesto se compara con dos modelos *Benchmark*. El primero de ellos es un modelo que no considera la depreciación. El segundo, es un modelo que considera depreciación lineal, pero que está restringido al uso de bodegas regulares. Los modelos consideran un horizonte de análisis de 60 períodos, tarifa de transporte baja, demanda en forma de rampa, y oferta en forma de rampa parcialmente disponible en el horizonte de análisis.

6.6.1 Modelo Benchmark 1

La Tabla 6-4 presenta una comparación del modelo Benchmark sin depreciación de productos con sus contrapartes que consideran depreciación (lineal y no lineal).

Tabla 6-4 Comparación de resultados - Modelo Benchmark 1

	Modelo Benchmark 1⁸	Modelo con depreciación lineal (escenario 44)	Modelo con depreciación no lineal (escenario 60)
Función objetivo	67.737.000.000	67.516.000.000	67.463.700.000
Corrección por venta depreciación lineal	67,278,542,600 (458.457.400)	-	-
Corrección por venta depreciación no lineal	67,110,711,800 (626.288.200)	-	-
Costos de transporte (proveedores a bodegas)	590.253.000	745.008.000	743.339.000
Costos de transporte (bodegas a clientes)	535.668.000	424.768.000	425.586.000
Costos de localización	273.160.000	294.630.000	294.630.000
Número de instalaciones	4	3	3
Tipo de instalaciones	Bodegas regulares	Bodegas refrigeradas	Bodegas refrigeradas
Costos de Inventario	259.373.000	126.430.000	108.922.000
Costos de producción	57.677.100.000	57.542.100.000	57.528.600.000

Fuente: elaboración propia

De la Tabla 6-4, el modelo Benchmark 1 presenta cualidades sustancialmente diferentes respecto a los escenarios 44 y 60. Primero, el beneficio obtenido es ligeramente superior en el modelo Benchmark. Por otra parte, las bodegas elegidas son bodegas regulares, no bodegas refrigeradas. Este resultado es intuitivo dado que, al no considerar la

⁸ Valor de la corrección entre paréntesis

depreciación, para el modelo los productos agrícolas se comportan como un producto no – perecedero. Por ende, no existe ningún beneficio adicional en la elección de bodegas refrigeradas. Todo lo contrario, las bodegas regulares tienen costos de arriendo inferiores y el modelo las prefiere, pues le permiten obtener un beneficio sin afectación alguna en el precio de venta de los productos.

Además, es llamativo que en el modelo Benchmark la configuración de la red cambia, añadiendo una bodega más respecto a los casos que consideran depreciación. Al inspeccionar los niveles de inventario en la Figura 6-8, puede verse que en el período 54, cuando deja de haber oferta de productos, los niveles de inventario de ambos productos suman 500 toneladas. Esto representa copar la máxima capacidad de almacenamiento de las 4 bodegas regulares (125 toneladas por bodega). Esto se ve reflejado en los costos de inventario, que son entre 2 y 2.4 veces mayores en el modelo Benchmark respecto a los escenarios 44 y 60.

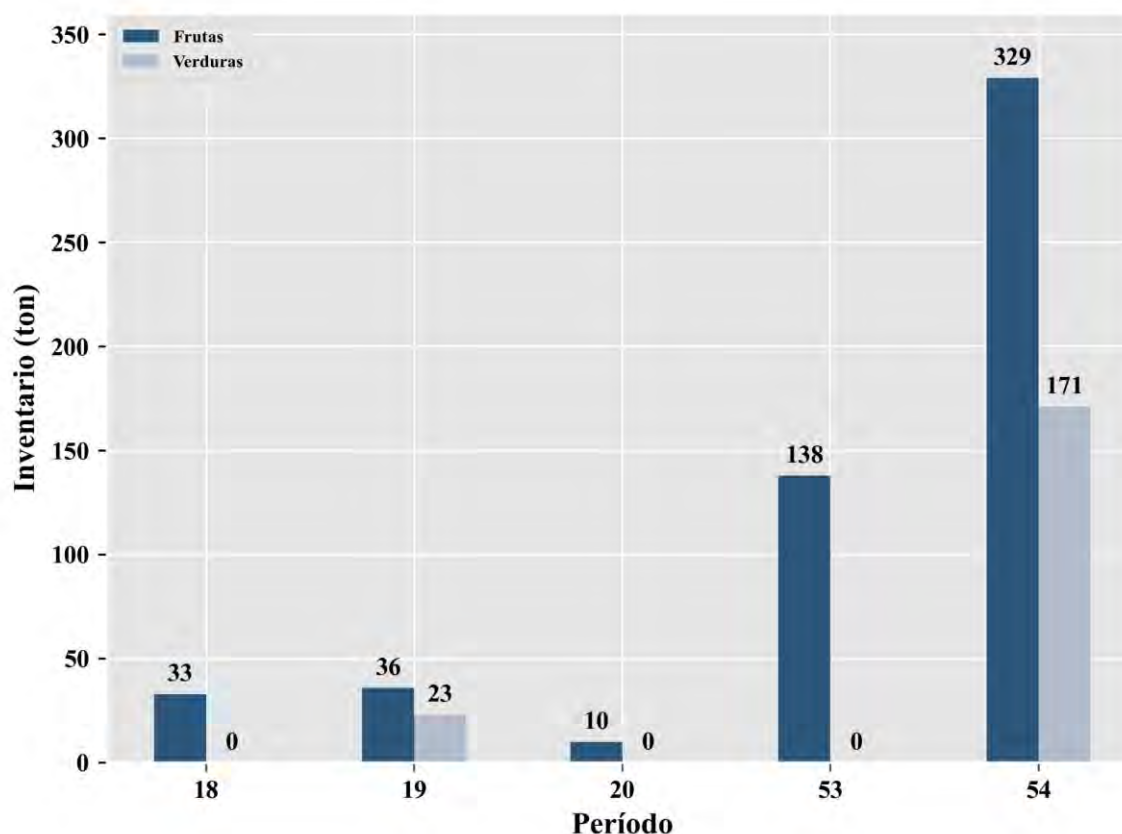


Figura 6-8 Niveles de inventario en el modelo Benchmark 1

Fuente: elaboración propia

Esta decisión en la configuración de la red se debe a que el modelo requiere mayor capacidad de almacenamiento de modo que pueda satisfacer la mayor demanda posible una vez que ya no haya oferta disponible.

No obstante, el modelo Benchmark parte de una suposición *inocente* al considerar que no existe depreciación en los productos. Es necesario hacer una corrección en el precio de venta de aquellos productos vendidos con calidad 2 o mayor. En la Figura 6-9 se presenta una comparación entre el precio de venta bajo la suposición *inocente* del modelo Benchmark (barras azul oscuro), y los casos de depreciación lineal (barras grises) y no lineal (barras azul claro).

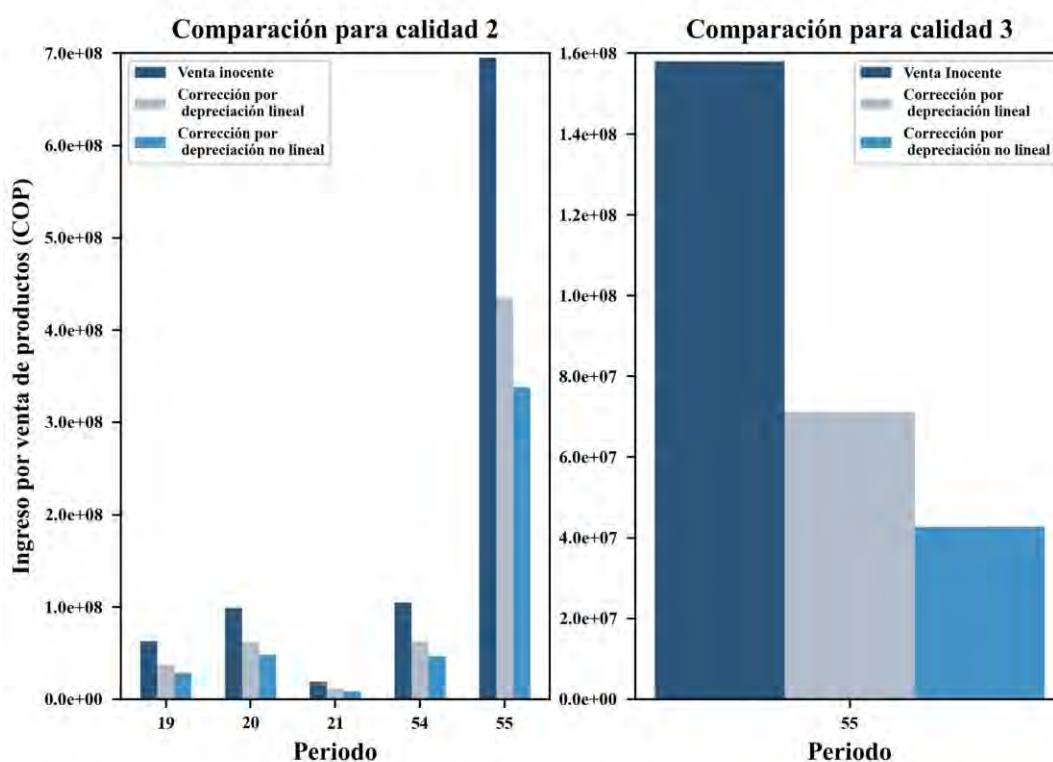


Figura 6-9 Corrección en el precio de venta de productos del modelo Benchmark

Fuente: elaboración propia

Efectivamente, el modelo Benchmark realiza sobre estimaciones en el precio de venta de los productos. La diferencia es ostensible en el caso de productos con calidad 2 del período 55. De hecho, en promedio, las sobre estimaciones son 40% más altas respecto al caso de depreciación lineal, y 54% más en el caso de depreciación no lineal.

La comparación del modelo propuesto con el modelo Benchmark 1 permite realizar los siguientes aportes a los aspectos gerenciales. Primero, la consideración de la perecibilidad de los productos puede tener una importante incidencia en decisiones estratégicas del diseño de cadenas de suministro, tales como la localización de instalaciones y la selección del tipo de instalaciones, como pudo observarse en el cambio de la configuración de la red discutido en este numeral. Este aspecto es trascendental en el diseño de las cadenas ya que una vez

ubicada una instalación (bodega o centro de distribución), es muy difícil trasladarla. Elecciones equivocadas podrían tener impactos altamente significativos tanto financieramente (costo asociado a la construcción o arriendo de una instalación) como en posteriores decisiones de carácter táctico – operacional (como el proceso de distribución).

Segundo, en el diseño de cadenas de suministro de productos perecederos es muy importante considerar apropiadamente el efecto de la perecibilidad sobre la calidad, y consecuentemente sobre el precio de venta de los productos. De lo contrario, se incurre en sobre estimaciones financieras que pueden tener un impacto considerable sobre los balances o márgenes de utilidad estimados dependiendo de qué tan rápido se degrade un producto. Es altamente relevante mencionar que dicho efecto puede acentuarse una vez que se consideran la variabilidad en la oferta y la demanda de los productos, escenarios en los cuales es probable que exista un desfase entre la oferta y la demanda y podría incurrirse en casos de desperdicio de productos, lo cual generaría pérdidas; o demanda insatisfecha si se demandan productos con determinada calidad mínima.

6.6.2 *Modelo Benchmark 2*

La Tabla 6-5 presenta una comparación del modelo Benchmark 2, el cual considera depreciación lineal en los productos pero restringido a la utilización de bodegas regulares, con sus contrapartes que consideran depreciación lineal y no lineal, pero que no cuentan con esta restricción adicional respecto al tipo de bodegas.

Tabla 6-5 Comparación de resultados - Modelo Benchmark 2

	Modelo Benchmark 2	Modelo con depreciación lineal (escenario 44)	Modelo con depreciación no lineal (escenario 60)
Función objetivo	39.292.300.000	67.516.000.000	67.463.700.000
Costos de transporte (proveedores a bodegas)	733.473.000	745.008.000	743.339.000
Costos de transporte (bodegas a clientes)	422.291.000	424.768.000	425.586.000
Costos de localización	204.870.000	294.630.000	294.630.000
Número de instalaciones	3	3	3
Tipo de instalaciones	Bodegas regulares	Bodegas refrigeradas	Bodegas refrigeradas
Costos de Inventario	73.836.400	126.430.000	108.922.000
Costos de producción	57.426.200.000	57.542.100.000	57.528.600.000

Fuente: elaboración propia

De la Tabla 6-5, puede decirse que el beneficio obtenido en el sistema (función objetivo) es notoriamente menor. Se observa una súbita reducción de la función objetivo, de aproximadamente el 40% respecto a los escenarios 44 y 60. Al examinar los costos de producción, puede verse que la diferencia es mínima respecto a los escenarios. Por tanto, la reducción en el beneficio percibido no se debe a demanda insatisfecha. Las diferencias son

igualmente mínimas al comparar los costos de transporte. De hecho, la reducción en el beneficio obtenido sucede ya que la naturaleza de las bodegas regulares expone a los productos a condiciones menos favorables, lo cual se evidencia en productos de *menor* calidad y por tanto menor precio de venta.

Otro aspecto por señalar es la reducción en los costos de inventario. Al explorar los niveles de inventario en cada uno de los escenarios, pueden verse claras diferencias, como lo muestra la Figura 6-10.

Los niveles de inventario del modelo Benchmark son más bajos que los de los escenarios de modelación usados para la comparación. Incluso en el período 54 donde, como se ha dicho previamente, la oferta deja de estar disponible para los escenarios de comparación de este numeral, el sistema no copa su capacidad, como si lo hacen los escenarios 44 y 60.

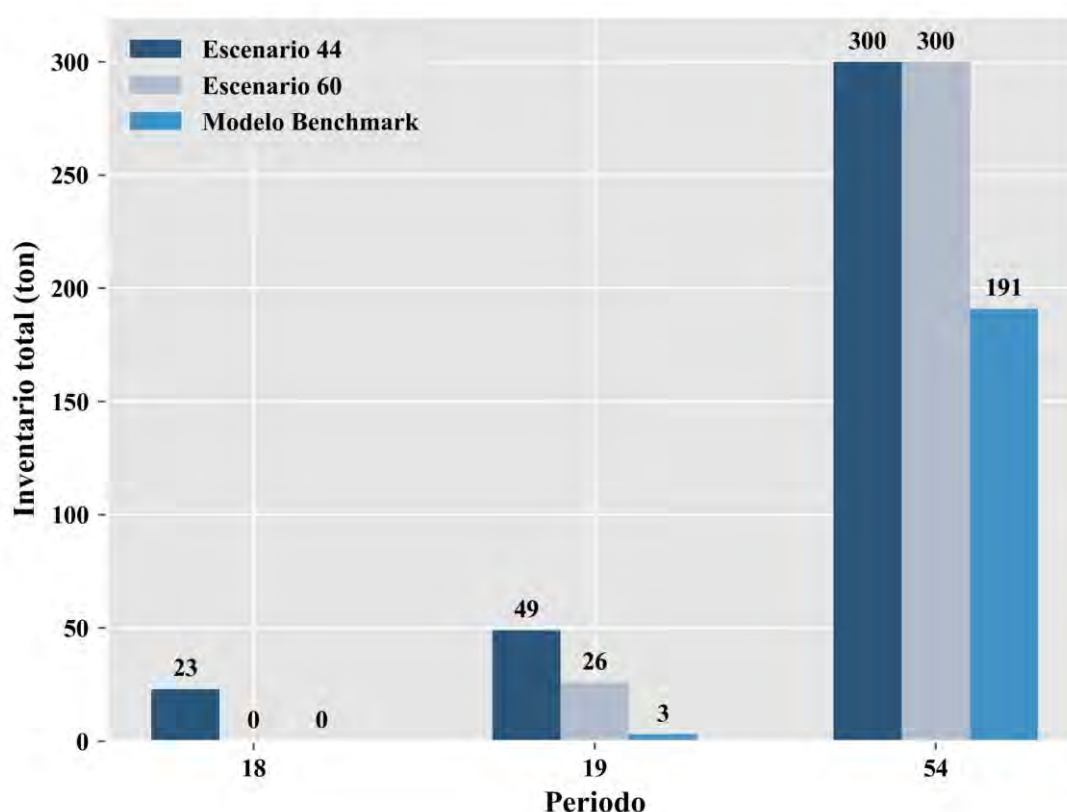


Figura 6-10 Comparación de niveles de inventario - Modelo Benchmark 2, escenario 44 y escenario 60
Fuente: elaboración propia

Este comportamiento ocurre ya que las bodegas regulares no proporcionan condiciones apropiadas para la preservación de los productos en buena calidad. Por ello, al modelo le resulta mucho menos atractivo conservar productos en inventario, ya que el margen de utilidad percibido por tonelada de producto vendido será mucho menor con cada período transcurrido.

En lo referente a la configuración de la red, de la Tabla 6-5 puede verse que en el caso del modelo Benchmark 2 se eligen 3 instalaciones, al igual que en los escenarios 44 y 60. Al realizar una inspección más detallada, se encontró que de hecho no solo es el mismo número de instalaciones, sino que están ubicadas en los mismos lugares. Lo anterior permite ver que la configuración de la red no se ve afectada por la restricción adicional incluida.

Es llamativo que al elegir el mismo número de bodegas y en las mismas ubicaciones, pero contando con mayor capacidad total de almacenamiento, el modelo Benchmark 2 tiene niveles de inventario menores. Esto sugiere que posiblemente en la relación *costo – beneficio* de preservar productos en inventario para satisfacer demanda del siguiente período versus entregar la mayor cantidad de productos en calidad máxima, el modelo se inclina por la última opción. Esto soporta los comentarios hechos previamente sobre qué tan atractivo resulta para el modelo mantener inventario con esta restricción adicional.

La comparación del modelo propuesto con el modelo Benchmark 2 permite realizar la siguiente contribución a los aspectos gerenciales. En el diseño de cadenas de abastecimiento de productos agrícolas perecederos, la elección de instalaciones que permitan preservar adecuadamente los productos tiene un impacto significativo sobre la calidad de los productos, lo cual se puede ver reflejado en los beneficios totales percibidos por la cadena.

Igualmente, la elección de instalaciones que no ofrezcan condiciones apropiadas para el almacenamiento de productos puede llevar a bajos niveles de inventario. Por tanto, se hace necesario evaluar el impacto del tipo de instalación elegida sobre los productos almacenados de modo que no se incurra en la construcción o arrendamiento de instalaciones *sobre dimensionadas*; es decir, que exista una gran capacidad de almacenamiento inutilizada.

7 Recomendaciones

En esta sección se proponen formas de abordar dos temas que constituyen una extensión del presente proyecto de investigación: el caso de pérdida de productos en un escenario de modelación que considera variabilidad en la demanda, y el problema de ruteo de vehículos. Además, se proponen formas de dinamizar el mercado.

7.1 Caso de pérdida de productos

Como se ha discutido ampliamente, las cadenas de abastecimiento de productos perecederos están sujetas a variabilidad. La variabilidad en la oferta y la demanda pueden incidir considerablemente sobre los niveles de inventario. A pesar de que en este proyecto de investigación se incluyó la perecibilidad de los productos en la modelación, no se estimaron pérdidas por productos desperdiciados. Dadas las características de la demanda (determinística), el modelo en ninguna circunstancia optaría por decisiones de compra de productos para que estos sean almacenados hasta que *se pierdan* (i.e. sean desechados).

A continuación se propone una solución teórica bajo un contexto de modelación que considere la variabilidad en la demanda en el cual podrían darse situaciones de inventario mayor que el necesario y en el que efectivamente existan productos desperdiciados. Para ello, se propone la creación de un parámetro, una variable, y una restricción adicional, como se indica en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1 Notación adicional en el modelo matemático para el caso de pérdida de productos

G_{pkr}	(35)	Parámetro. Indexado en p, k y r	Rentabilidad del producto p . Toma valores 1 o 0 acorde a las siguientes condiciones: $G_{pkr} \begin{cases} V_{pkr} - C_{lpr} - \overline{C_{pij}} > \sigma, & 0 \\ \text{en otro caso,} & 1 \end{cases}$
L_{pit}	(36)	Variable de decisión. Indexada en p, i , y $t \in \{2, \dots, T\}$	Cantidad de producto p con calidad k descartado en la instalación i de tipo r en el período t
$L_{pit} = I_{pit-1,k-1}^r G_{pkr}$	(37)	Restricción. Activa $\forall p \in P, i \in I, r \in R, t \in \{2, \dots, T\}, k \in \{2, \dots, K\}$	

Fuente: elaboración propia

Como se señala en (36), L_{pit} es la cantidad de producto p desperdiciado o perdido en la instalación i en el período t . Respecto a la definición del parámetro G_{pkr} indicado en (35), se aclara que $\overline{C_{pij}}$, denota el costo medio de llevar una unidad de producto p de una bodega (i) a un cliente (j), mientras que el símbolo σ denota un valor mínimo de “rentabilidad” esperado. Es importante aclarar que este concepto de *rentabilidad*

es “a partir” de la bodega. En otras palabras, no considera los costos asociados a llevar el producto hasta la bodega.

Bajo el modelo matemático propuesto, se tiene un conjunto de precios de venta de los productos definido por V_{pkr} , donde k es el índice de calidades. Como se mencionó en la sección 4.2.2, cada producto p es descartado⁹ a un determinado valor de k . El parámetro G_{pkr} ayuda a preservar la generalidad del modelo, al evitar tener que indicar bajo cada sumatoria las combinaciones de productos – calidades – tipo de instalación bajo el cual debería estimarse la cantidad de productos descartados. Esto es ventajoso al expresar de forma concisa el cálculo.

De hecho, las restricciones (37) permiten eliminar no solo los productos que alcanzan una calidad no apta para la venta, sino todos aquellos productos que no sean rentables. Es posible que un producto tenga un precio de venta mayor que 0, y que, no obstante, ya no permita obtener una utilidad real debido a que los costos de inventario y de transporte hasta el cliente sean mayores que dicho precio de venta. Esto puede regularse a través del valor asignado de σ .

Las restricciones (37) operan de la siguiente manera: en el período t , el modelo revisa el inventario del producto p existente en la bodega i de tipo r en el período anterior ($t - 1$) con calidad “anterior” ($k - 1$). En caso de que, para una calidad k (i.e. la calidad del período de revisión t) dicho producto bajo esa combinación de calidad y tipo de instalación (k, r) ya no sea rentable, el parámetro G_{pkr} toma el valor de 1, y por tanto el inventario correspondiente es descartado. En otro caso el parámetro G_{pkr} toma el valor 0 y por ende no hay descarte de productos.

Añadiendo la variable L_{pit} a la función objetivo y con un costo asociado apropiado, pueden cuantificarse las pérdidas en la red debido a productos descartados.

7.2 Consideración del problema de distribución o ruteo de vehículos

El problema de distribución o ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés) es un problema táctico – operacional de gran importancia en el diseño y gestión de cadenas de suministro. Acorde Ranieri et al., (2018), la etapa de distribución es la menos eficiente de las cadenas de suministro. Esto ha promovido el interés hacia una eficiente programación del ruteo de vehículos de modo que se minimicen los costos de transporte asociados (Castillo-Villar et al., 2014; De la Cruz et al., 2013).

El problema que consiste en la determinación de la ruta que permite que los vehículos satisfagan la demanda de todos los clientes de la red de modo que se minimicen los costos. Este problema es uno de los más estudiados en la literatura relacionada a planeación de transporte y diseño de cadenas de suministro (lectores interesados pueden dirigirse a los

⁹ En el contexto, cabe aclarar que un producto que *perece* es aquel que alcanza un precio de venta 0.

trabajos de Braekers et al., (2016), Eksioglu et al., (2009) o Konstantakopoulos et al., (2020), que son algunas de las tantas revisiones de la literatura sobre el tema).

El problema puede formularse matemáticamente de la siguiente forma:

$$\text{Min: } \sum_{1 \leq k \leq K} \sum_{\forall (i,j) \in A} C_{ij} x_{ij}^k \quad (38)$$

Sujeto a:

$$\sum_{1 \leq k \leq K} x_{ij}^k = y_{ij} \quad (39)$$

$$\sum_{1 \leq j \leq n} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in N - \{1\} \quad (40)$$

$$\sum_{1 \leq j \leq n} y_{ij} = 1 \quad \forall j \in N - \{1\} \quad (41)$$

$$\sum_{1 \leq j \leq n} y_{1j} = K \quad (42)$$

$$\sum_{1 \leq i \leq n} y_{i1} = K \quad (43)$$

$$\sum_{2 \leq i \leq n} \sum_{1 \leq j \leq n} d_i x_{ij}^k \leq u \quad \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (44)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} y_{ij} \leq |Q| - 1 \quad \forall Q \subseteq \{2, 3, \dots, n\} \quad (45)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (46)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, k = 1, 2, \dots, K \quad (47)$$

Donde:

A : conjunto de arcos de la red

K : es la flota de vehículos

U : es la capacidad de los vehículos

d_j : es la demanda del cliente j

N : es el total de nodos de la red.

y_{ij} : es una variable de decisión, que toma el valor 1 si un vehículo sirve el arco ij , y 0 en otro caso.

x_{ij}^k : es una variable de decisión, que toma el valor 1 si el vehículo k sirve el arco ij y 0 en otro caso.

C_{ij} : es el costo del arco ij .

La formulación del problema propuesta en (38) sujeta a las restricciones (39) a (47) puede extenderse para considerar no solo los costos internos (como tiempo y costos de operación), sino además los costos por externalidades. Tal como en el caso de estudio aplicado, pueden utilizarse los valores de referencia de Márquez & Cantillo (2013) como una buena aproximación a los costos por externalidad. Incluyendo estos costos en la función objetivo, puede obtenerse un problema que también minimiza costos sociales.

Otro camino de investigación lo constituye la estimación de los costos por externalidad para vehículos de carga en centros urbanos (específicamente, en el AMB), los cuales, debido al contexto en que se hace la distribución, pueden diferir de la estimación realizada para vías principales. Esta información sería útil para resolver el problema de optimización del VRP con resultados más precisos.

Futuras investigaciones podrían abordar el problema de ruteo de vehículos para productos perecederos en el contexto de estudio, bien sea individualmente o de forma simultánea con otras decisiones en el diseño de la cadena de suministro.

7.3 Estrategias de dinamización del mercado

Con el propósito de incentivar a la población a que apoye el consumo de productos locales, se propone la implementación de mercados rotativos. Esta forma de mercado consiste en emplazar a los comerciantes con sus productos en un determinado lugar que cuente con las características para el comercio (balanzas, protección contra el clima, seguridad) y con la particularidad de que su ubicación es temporal. En un período posterior (día siguiente, semana siguiente, etcétera), el mercado puede ubicarse en otro barrio u otra zona de la ciudad donde se quiera implementar la estrategia. Ésta es una forma de llevar a la población productos más frescos. La inclusión de este espacio podría incentivar una dinámica de compra, atrayendo a los habitantes del sector.

Claramente, la estrategia requiere del acompañamiento y apoyo de entidades de gobierno locales y/o departamentales, que permitan coordinar el transporte de los productos, adecuar el espacio escogido para tal fin (bien sea un parque, un lote o una construcción existente), proporcionar las herramientas básicas para el comercio (balanzas, mesas y carpas para la protección contra el clima) y seguridad. La publicidad también juega un papel importante ya que por medio de ella se puede no solo informar a la población sino incentivarla a que adquieran productos locales. Asimismo, el apoyo en aspectos clave como la estimación del precio de venta y el control de calidad de los productos, es esencial para que los mercados rotativos se conviertan en una alternativa verdaderamente atractiva y competitiva.

Adicionalmente, la implementación de *promociones* como precios más bajos para compras de cantidades mayores (es decir, economías de escala), también puede utilizarse como estrategia de dinamización.

8 Conclusiones

En la presente investigación se propuso un modelo matemático para el diseño de una cadena de suministro de productos perecederos, tomando como caso de aplicación el departamento del Atlántico. El diseño de la red en el caso de aplicación consideró a todos los municipios (excepto Puerto Colombia y Barranquilla) como potenciales proveedores, seis clientes que capturan la demanda de Barranquilla, Santa Marta, Riohacha, Cartagena y Valledupar, dos tipos de productos agrícolas perecederos (frutas y verduras), dos *formas* de depreciación de los productos acorde a la pérdida de calidad (*lineal* y *no lineal*), y dos tipos de bodegas para el almacenamiento de inventario (bodegas regulares y bodegas refrigeradas).

Se plantearon numerosos escenarios en los que se consideraron variaciones en la tarifa de transporte, depreciación de los productos, horizonte de análisis, disponibilidad de la oferta, y formas de las curvas de oferta y demanda. Los resultados de modelación permiten visualizar el impacto de los diferentes costos logísticos sobre el modelo de cadena de abastecimiento propuesto, destacando el impacto de los costos de producción sobre los costos totales de la cadena. En lo referente a los costos de transporte, puede notarse que un incremento en las tarifas de transporte tiende a verse reflejado en cambios en la configuración de la red con la inclusión de bodegas adicionales, siempre que la oferta esté disponible en todo el horizonte de análisis. No obstante, el efecto de las tarifas de transporte pierde relevancia en lo relacionado al número de instalaciones a emplazar ante escenarios en los que la oferta no esté disponible en todo el horizonte de diseño.

Para el caso de aplicación implementado, el modelo elige siempre instalaciones *refrigeradas* debido a las mejores condiciones para el almacenamiento de producto, que se ven reflejadas en una depreciación menos vertiginosa. En términos generales, el modelo bien tiende a un *crossdocking* o propende a mantener bajos niveles de inventario. El sistema propuesto busca entregar productos en la mayor calidad posible pues esta representa un mayor beneficio.

Esta investigación realiza las siguientes contribuciones. Desde el punto de vista metodológico, se plantea un modelo de producción – localización – asignación – inventario multi – período y multi – producto para bienes perecederos, con la posibilidad de elegir diferentes instalaciones con distinto impacto sobre la preservación de los productos, que pretende explotar los beneficios de la toma de decisiones conjuntas, en lugar de secuenciales. Acorde a lo revisado en la literatura, éste es el primer modelo de ese estilo bajo el contexto modelado. Más allá del caso propuesto, el modelo cuenta con generalidad suficiente para extenderse a otros contextos o tipos de productos perecederos, como las cadenas de abastecimiento de productos farmacéuticos, bancos de sangre o flores.

Desde una perspectiva de gestión, se destacan las siguientes contribuciones a los aspectos gerenciales. Primero, la consideración de la perecibilidad de los productos en cadenas de suministro que manejan este tipo de bienes puede afectar la configuración de la red, como se muestra tras la comparación con el modelo Benchmark 1. Asimismo, debe considerarse la perecibilidad y el impacto que ésta tiene sobre el precio de venta de los productos de modo que puedan tenerse estimaciones precisas sobre el beneficio financiero

percibido por la cadena, como puede verse en la comparación del mismo modelo. Además, es razonable considerar la ubicación de instalaciones que permitan preservar apropiadamente los productos perecederos manejados por la cadena por sobre instalaciones *regulares*; es decir, aquellas que no brinden ningún tipo de mejoría en las condiciones de almacenamiento. De otro modo, el impacto sobre el beneficio percibido es altamente significativo y está relacionado con la rapidez con la que se deprecian los bienes, como puede notarse a través de la comparación con el modelo Benchmark 2. Por último, es necesario evaluar el impacto del tipo de instalación (e.g. bodega) y sus condiciones de almacenamiento para productos perecederos, dado que esto puede repercutir en la relación nivel de inventario/capacidad de almacenamiento. Instalaciones con una baja relación en este rubro representan capacidad inutilizada y por tanto pérdidas para las compañías.

Se espera que los hallazgos de esta aproximación metodológica y caso de implementación sean útiles para las autoridades y tomadores de decisiones respecto a acciones a implementar para mejorar las condiciones de la logística agrícola en el Atlántico. No obstante, existen una serie de supuestos bajo los cuales se planteó el modelo y se solucionó el caso de aplicación. A continuación se presentan algunas extensiones o campos que pueden ser abordados por investigaciones futuras.

En esta investigación se realizó una linealización sobre la formulación del modelo matemático inicial, el cual era un modelo entero – mixto no lineal. Particularmente, se consideró un conjunto de *calidades* como valores discretos y constantes que permitió eliminar los términos exponenciales en la función objetivo. Este procedimiento facilitó la estimación del modelo. Futuras investigaciones podrían abordar el problema bajo la no – linealidad, el cual representa un tipo de problema computacionalmente más complejo, pero que podría aportar resultados más precisos si se cuentan con valores sensatos para los parámetros de depreciación de los productos (parámetros de escala y de forma en la distribución de Weibull).

Por otra parte, se consideró que todos los productos eran entregados con *calidad máxima*. Debido a diversos factores logísticos (como el cargue, transporte, descargue, y tipo de embalaje) y de la producción misma, es probable que muchos productos no sean entregados en óptimas condiciones por los proveedores. Un modelo que considere diversas calidades de productos entregados por los proveedores podría abordar este aspecto, sumamente común en la realidad. Para ello, un modelo que implemente la política de gestión de inventario *fresh first* (“lo más fresco primero”) propuesta por Coelho & Laporte (2014) constituye un área de investigación a explorar en la toma de decisiones estratégicas y tácticas de manera conjunta.

Por último, se trabajó bajo el supuesto de una oferta y demanda determinísticas. Es sabido que la producción agrícola está sujeta a diversos factores, que pueden afectarla (como el clima). Por tanto, la consideración de variabilidad tanto en la oferta como en la demanda constituye otro camino de investigación atractivo y que podría ajustarse mejor a las condiciones reales. Para ello, enfoques de modelación estocástica u optimización robusta son candidatos ideales en la solución de escenarios que consideran variabilidad o incertidumbre.

Apéndice A.

Tabla I-1 Relación de escenarios de modelación y parámetros – parte 1

Escenario	Oferta	Demanda	Horizonte	Carácter de la oferta	Depreciación ¹⁰	Costos de Transporte
MOD1	Oferta Creciente	Demanda Creciente	60	Disponible en todo el H	Lineal	Altos
MOD2	Oferta Rampa	Demanda Creciente	60	Disponible en todo el H	Lineal	Altos
MOD3	Oferta Creciente	Demanda Rampa	60	Disponible en todo el H	Lineal	Altos
MOD4	Oferta Rampa	Demanda Rampa	60	Disponible en todo el H	Lineal	Altos
MOD5	Oferta Creciente	Demanda Creciente	90	Disponible en todo el H	Lineal	Altos
MOD6	Oferta Rampa	Demanda Creciente	90	Disponible en todo el H	Lineal	Altos
MOD7	Oferta Creciente	Demanda Rampa	90	Disponible en todo el H	Lineal	Altos
MOD8	Oferta Rampa	Demanda Rampa	90	Disponible en todo el H	Lineal	Altos
MOD9	Oferta Creciente	Demanda Creciente	60	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Altos
MOD10	Oferta Rampa	Demanda Creciente	60	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Altos
MOD11	Oferta Creciente	Demanda Rampa	60	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Altos
MOD12	Oferta Rampa	Demanda Rampa	60	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Altos
MOD13	Oferta Creciente	Demanda Creciente	90	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Altos
MOD14	Oferta Rampa	Demanda Creciente	90	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Altos
MOD15	Oferta Creciente	Demanda Rampa	90	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Altos
MOD16	Oferta Rampa	Demanda Rampa	90	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Altos
MOD17	Oferta Creciente	Demanda Creciente	60	Disponible en todo el H	No Lineal	Altos
MOD18	Oferta Rampa	Demanda Creciente	60	Disponible en todo el H	No Lineal	Altos
MOD19	Oferta Creciente	Demanda Rampa	60	Disponible en todo el H	No Lineal	Altos
MOD20	Oferta Rampa	Demanda Rampa	60	Disponible en todo el H	No Lineal	Altos
MOD21	Oferta Creciente	Demanda Creciente	90	Disponible en todo el H	No Lineal	Altos
MOD22	Oferta Rampa	Demanda Creciente	90	Disponible en todo el H	No Lineal	Altos
MOD23	Oferta Creciente	Demanda Rampa	90	Disponible en todo el H	No Lineal	Altos
MOD24	Oferta Rampa	Demanda Rampa	90	Disponible en todo el H	No Lineal	Altos
MOD25	Oferta Creciente	Demanda Creciente	60	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Altos

¹⁰ Remitirse a sección 4.2.2 para aclaración conceptual

Tabla I-2 Relación de escenarios de modelación y parámetros – parte 2

Escenario	Oferta	Demanda	Horizonte	Carácter de la oferta	Depreciación	Costos de Transporte
MOD26	Oferta Rampa	Demanda Creciente	60	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Altos
MOD27	Oferta Creciente	Demanda Rampa	60	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Altos
MOD28	Oferta Rampa	Demanda Rampa	60	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Altos
MOD29	Oferta Creciente	Demanda Creciente	90	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Altos
MOD30	Oferta Rampa	Demanda Creciente	90	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Altos
MOD31	Oferta Creciente	Demanda Rampa	90	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Altos
MOD32	Oferta Rampa	Demanda Rampa	90	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Altos
MOD33	Oferta Creciente	Demanda Creciente	60	Disponible en todo el H	Lineal	Bajos
MOD34	Oferta Rampa	Demanda Creciente	60	Disponible en todo el H	Lineal	Bajos
MOD35	Oferta Creciente	Demanda Rampa	60	Disponible en todo el H	Lineal	Bajos
MOD36	Oferta Rampa	Demanda Rampa	60	Disponible en todo el H	Lineal	Bajos
MOD37	Oferta Creciente	Demanda Creciente	90	Disponible en todo el H	Lineal	Bajos
MOD38	Oferta Rampa	Demanda Creciente	90	Disponible en todo el H	Lineal	Bajos
MOD39	Oferta Creciente	Demanda Rampa	90	Disponible en todo el H	Lineal	Bajos
MOD40	Oferta Rampa	Demanda Rampa	90	Disponible en todo el H	Lineal	Bajos
MOD41	Oferta Creciente	Demanda Creciente	60	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Bajos
MOD42	Oferta Rampa	Demanda Creciente	60	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Bajos
MOD43	Oferta Creciente	Demanda Rampa	60	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Bajos
MOD44	Oferta Rampa	Demanda Rampa	60	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Bajos
MOD45	Oferta Creciente	Demanda Creciente	90	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Bajos
MOD46	Oferta Rampa	Demanda Creciente	90	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Bajos
MOD47	Oferta Creciente	Demanda Rampa	90	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Bajos
MOD48	Oferta Rampa	Demanda Rampa	90	Parcialmente disponible en el H	Lineal	Bajos
MOD49	Oferta Creciente	Demanda Creciente	60	Disponible en todo el H	No Lineal	Bajos
MOD50	Oferta Rampa	Demanda Creciente	60	Disponible en todo el H	No Lineal	Bajos

Tabla I-3 Relación de escenarios de modelación y parámetros – parte 3

Escenario	Oferta	Demanda	Horizonte	Carácter de la oferta	Depreciación	Costos de Transporte
MOD51	Oferta Creciente	Demanda Rampa	60	Disponible en todo el H	No Lineal	Bajos
MOD52	Oferta Rampa	Demanda Rampa	60	Disponible en todo el H	No Lineal	Bajos
MOD53	Oferta Creciente	Demanda Creciente	90	Disponible en todo el H	No Lineal	Bajos
MOD54	Oferta Rampa	Demanda Creciente	90	Disponible en todo el H	No Lineal	Bajos
MOD55	Oferta Creciente	Demanda Rampa	90	Disponible en todo el H	No Lineal	Bajos
MOD56	Oferta Rampa	Demanda Rampa	90	Disponible en todo el H	No Lineal	Bajos
MOD57	Oferta Creciente	Demanda Creciente	60	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Bajos
MOD58	Oferta Rampa	Demanda Creciente	60	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Bajos
MOD59	Oferta Creciente	Demanda Rampa	60	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Bajos
MOD60	Oferta Rampa	Demanda Rampa	60	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Bajos
MOD61	Oferta Creciente	Demanda Creciente	90	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Bajos
MOD62	Oferta Rampa	Demanda Creciente	90	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Bajos
MOD63	Oferta Creciente	Demanda Rampa	90	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Bajos
MOD64	Oferta Rampa	Demanda Rampa	90	Parcialmente disponible en el H	No Lineal	Bajos

Tabla 1-4 Relación escenarios de modelación, tamaño del problema y tiempo de solución – parte 1

Escenario	No. Variables Dummy	No. Variables lineales	Total Variables	No. No-Ceros	No. Restricciones de igualdad	No. Restricciones de Desigualdad	Total Restricciones	Tiempo de solución (s)	Tiempo de solución (min)
MOD1	819	427.918	428.737	3.465.059	40.494	737.206	777.700	1111,81	18,5
MOD2	819	428.262	429.081	3.467.763	40.494	737.886	778.380	641,98	10,7
MOD3	819	427.918	428.737	3.465.059	40.494	737.206	777.700	834,38	13,9
MOD4	819	428.262	429.081	3.467.763	40.494	737.886	778.380	903,34	15,1
MOD5	819	649.289	650.108	5.257.765	61.914	1.116.731	1.178.645	5491,70	91,5
MOD6	819	650.622	651.441	5.268.243	61.914	1.119.366	1.181.280	488,80	8,1
MOD7	819	649.289	650.108	5.257.765	61.914	1.116.731	1.178.645	682,11	11,4
MOD8	819	650.622	651.441	5.268.243	61.914	1.119.366	1.181.280	880,59	14,7
MOD9	819	333.840	334.659	2.703.729	32.430	573.396	605.826	246,06	4,1
MOD10	819	399.918	400.737	3.239.085	38.730	686.862	725.592	868,17	14,5
MOD11	819	333.840	334.659	2.703.729	32.430	573.396	605.826	636,42	10,6
MOD12	819	399.918	400.737	3.239.085	38.730	686.862	725.592	870,47	14,5
MOD13	819	593.260	594.079	4.804.289	57.420	1.018.456	1.075.876	817,31	13,6
MOD14	819	650.622	651.441	5.268.243	61.914	1.119.366	1.181.280	744,16	12,4
MOD15	819	593.260	594.079	4.804.289	57.420	1.018.456	1.075.876	2502,86	41,7
MOD16	819	593.260	594.079	4.804.289	57.420	1.018.456	1.075.876	1100,62	18,3
MOD17	819	427.918	428.737	3.492.149	40.494	737.206	777.700	1237,56	20,6
MOD18	819	428.262	429.081	3.494.853	40.494	737.886	778.380	916,27	15,3
MOD19	819	427.918	428.737	3.492.149	40.494	737.206	777.700	507,86	8,5
MOD20	819	428.262	429.081	3.494.853	40.494	737.886	778.380	807,64	13,5
MOD21	819	649.289	650.108	5.299.975	61.914	1.116.731	1.178.645	3159,25	52,7
MOD22	819	650.622	651.441	5.310.453	61.914	1.119.366	1.181.280	528,84	8,8
MOD23	819	649.289	650.108	5.299.975	61.914	1.116.731	1.178.645	463,86	7,7
MOD24	819	650.622	651.441	5.310.453	61.914	1.119.366	1.181.280	561,28	9,4
MOD25	819	427.918	428.737	3.492.149	40.494	737.206	777.700	311,66	5,2

Tabla 1-5 Relación escenarios de modelación, tamaño del problema y tiempo de solución – parte 2

Escenario	No. Variables Dummy	No. Variables lineales	Total Variables	No. No-Ceros	No. Restricciones de igualdad	No. Restricciones de Desigualdad	Total Restricciones	Tiempo de solución (s)	Tiempo de solución (min)
MOD26	819	399.918	400.737	3.266.049	38.730	686.862	725.592	643,25	10,7
MOD27	819	333.840	334.659	2.726.409	32.430	573.396	605.826	430,14	7,2
MOD28	819	399.918	400.737	3.266.049	38.730	686.862	725.592	950,45	15,8
MOD29	819	593.260	594.079	4.844.609	57.420	1.018.456	1.075.876	971,92	16,2
MOD30	819	593.260	594.079	4.844.609	57.420	1.018.456	1.075.876	439,52	7,3
MOD31	819	593.260	594.079	4.844.609	57.420	1.018.456	1.075.876	1560,89	26,0
MOD32	819	593.260	594.079	4.844.609	57.420	1.018.456	1.075.876	704,06	11,7
MOD33	819	427.918	428.737	3.465.059	40.494	737.206	777.700	927,52	15,5
MOD34	819	428.262	429.081	3.467.763	40.494	737.886	778.380	597,03	10,0
MOD35	819	427.918	428.737	3.465.059	40.494	737.206	777.700	698,78	11,6
MOD36	819	428.262	429.081	3.467.763	40.494	737.886	778.380	1275,28	21,3
MOD37	819	649.289	650.108	5.257.765	61.914	1.116.731	1.178.645	2662,98	44,4
MOD38	819	650.622	651.441	5.268.243	61.914	1.119.366	1.181.280	522,08	8,7
MOD39	819	649.289	650.108	5.257.765	61.914	1.116.731	1.178.645	497,03	8,3
MOD40	819	650.622	651.441	5.268.243	61.914	1.119.366	1.181.280	706,89	11,8
MOD41	819	333.840	334.659	2.703.729	32.430	573.396	605.826	396,11	6,6
MOD42	819	399.918	400.737	3.239.085	38.730	686.862	725.592	548,41	9,1
MOD43	819	333.840	334.659	2.703.729	32.430	573.396	605.826	691,88	11,5
MOD44	819	399.918	400.737	3.239.085	38.730	686.862	725.592	1113,42	18,6
MOD45	819	593.260	594.079	4.804.289	57.420	1.018.456	1.075.876	906,31	15,1
MOD46	819	593.260	594.079	4.804.289	57.420	1.018.456	1.075.876	604,77	10,1
MOD47	819	593.260	594.079	4.804.289	57.420	1.018.456	1.075.876	2298,22	38,3
MOD48	819	593.260	594.079	4.804.289	57.420	1.018.456	1.075.876	1071,58	17,9
MOD49	819	333.840	334.659	2.726.409	32.430	573.396	605.826	1049,81	17,5
MOD50	819	428.262	429.081	3.494.853	40.494	737.886	778.380	504,05	8,4

Tabla 1-6 Relación escenarios de modelación, tamaño del problema y tiempo de solución – parte 3

Escenario	No. Variables Dummy	No. Variables lineales	Total Variables	No. No-Ceros	No. Restricciones de igualdad	No. Restricciones de Desigualdad	Total Restricciones	Tiempo de solución (s)	Tiempo de solución (min)
MOD51	819	427.918	428.737	3.492.149	40.494	737.206	777.700	423,34	7,1
MOD52	819	428.262	429.081	3.494.853	40.494	737.886	778.380	1250,89	20,8
MOD53	819	649.289	650.108	5.299.975	61.914	1.116.731	1.178.645	3165,34	52,8
MOD54	819	650.622	651.441	5.310.453	61.914	1.119.366	1.181.280	484,17	8,1
MOD55	819	649.289	650.108	5.299.975	61.914	1.116.731	1.178.645	509,88	8,5
MOD56	819	650.622	651.441	5.310.453	61.914	1.119.366	1.181.280	681,11	11,4
MOD57	819	333.840	334.659	2.726.409	32.430	573.396	605.826	314,00	5,2
MOD58	819	399.918	400.737	3.266.049	38.730	686.862	725.592	466,64	7,8
MOD59	819	333.840	334.659	2.726.409	32.430	573.396	605.826	517,02	8,6
MOD60	819	428.262	429.081	3.494.853	40.494	737.886	778.380	880,38	14,7
MOD61	819	593.260	594.079	4.844.609	57.420	1.018.456	1.075.876	908,31	15,1
MOD62	819	593.260	594.079	4.844.609	57.420	1.018.456	1.075.876	546,19	9,1
MOD63	819	593.260	594.079	4.804.289	57.420	1.018.456	1.075.876	2201,88	36,7
MOD64	819	593.260	594.079	4.844.609	57.420	1.018.456	1.075.876	623,06	10,4

Referencias

- Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>
- Akkerman, R., Farahani, P., & Grunow, M. (2010). Quality, safety and sustainability in food distribution: A review of quantitative operations management approaches and challenges. In *OR Spectrum* (Vol. 32, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s00291-010-0223-2>
- Amorim, P., Günther, H. O., & Almada-Lobo, B. (2012). Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable products. *International Journal of Production Economics*, 138(1), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.005>
- Amorim, P., Meyr, H., Almeder, C., & Almada-Lobo, B. (2013). Managing perishability in production-distribution planning: A discussion and review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25(3), 389–413. <https://doi.org/10.1007/s10696-011-9122-3>
- Baloch, M. K., & Bibi, F. (2012). Effect of harvesting and storage conditions on the post harvest quality and shelf life of mango (*Mangifera indica* L.) fruit. *South African Journal of Botany*, 83, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2012.08.001>
- Baloch, Musa Kaleem, Bibi, F., & Jilani, M. S. (2011). Quality and shelf life of mango (*Mangifera indica* L.) fruit: As affected by cooling at harvest time. *Scientia Horticulturae*, 130(3), 642–646. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.08.022>
- Banerjee, S., & Agrawal, S. (2017). Inventory model for deteriorating items with freshness and price dependent demand: Optimal discounting and ordering policies. *Applied Mathematical Modelling*, 52, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.07.020>
- BID. (2011). *BID apoya Política Nacional Logística de Colombia* | IADB. <https://www.iadb.org/es/noticias/comunicados-de-prensa/2011-06-29/politica-nacional-logistica-de-colombia%2C9445.html>
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers and Industrial Engineering*, 99, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Calleja, G., Corominas, A., Martínez-Costa, C., & de la Torre, R. (2018). Methodological approaches to supply chain design1. *International Journal of Production Research*, 56(13), 4467–4489. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1412526>
- Castillo-Villar, K. K., González-Ramírez, R. G., Miranda González, P., & Smith, N. R. (2014). A heuristic procedure for a ship routing and scheduling problem with variable speed and discretized time windows. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/750232>
- Chakraborty, D., Jana, D. K., & Roy, T. K. (2018). Two-warehouse partial backlogging inventory model with ramp type demand rate, three-parameter Weibull distribution deterioration under inflation and permissible delay in payments. *Computers and*

- Industrial Engineering*, 123(June), 157–179. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.022>
- Chakwizira, J., Nhemachena, C., & Mashiri, M. (2010). *CONNECTING TRANSPORT, AGRICULTURE AND RURAL DEVELOPMENT: EXPERIENCES FROM MHLONTLO LOCAL MUNICIPALITY INTEGRATED INFRASTRUCTURE ATLAS*. Document Transformation Technologies. <https://researchspace.csir.co.za/dspace/handle/10204/4400>
- Chintapalli, P. (2014). Simultaneous pricing and inventory management of deteriorating perishable products. *Annals of Operations Research*, 229(1), 287–301. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1753-9>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation* (6th Edition). Pearson. <https://www.pearson.com/us/higher-education/program/Chopra-Supply-Chain-Management-Strategy-Planning-and-Operation-6th-Edition/PGM178843.html>
- Coelho, L. C., & Laporte, G. (2014). Optimal joint replenishment, delivery and inventory management policies for perishable products. *Computers and Operations Research*, 47, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.01.013>
- Cunha, L. M., Oliveira, F. A. R., & Oliveira, J. C. (1998). Optimal experimental design for estimating the kinetic parameters of processes described by the weibull probability distribution function. *Journal of Food Engineering*, 37(2), 175–191. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00085-5)
- Dai, Z., Aqlan, F., Zheng, X., & Gao, K. (2018). A location-inventory supply chain network model using two heuristic algorithms for perishable products with fuzzy constraints. *Computers and Industrial Engineering*, 119(May 2017), 338–352. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.007>
- DANE. (n.d.). *Mayoristas Boletín Semanal*. Retrieved September 4, 2020, from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/sistema-de-informacion-de-precios-sipsa/mayoristas-boletin-semanal-1>
- DANE. (2012). *Boletín trimestral ABASTECIMIENTO DE ALIMENTOS*. Características de Las Instalaciones y El Abastecimiento En Corabastos. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=capacidad+bodegas+dane>
- DANE. (2015). *Censo Nacional Agropecuario*. https://www.dane.gov.co/files/CensoAgropecuario/avanceCNA/CNA_agosto_2015_new_present.pdf
- Daskin, M., Snyder, L., & Berger, R. (2003). Facility Location in Supply Chain Design. *Logistics Systems: Design And*, 03, 38. https://doi.org/10.1007/0-387-24977-X_2
- DATLAS. (2020). *Datlas Colombia*. <http://datlascolombia.bancoldex.com/>
- De la Cruz, J. J., Paternina-Arboleda, C. D., Cantillo, V., & Montoya-Torres, J. R. (2013). A two-pheromone trail ant colony system—tabu search approach for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows and multiple products. *Journal of*

Heuristics, 19(2), 233–252. <https://doi.org/10.1007/s10732-011-9184-0>

de Keizer, M., Akkerman, R., Grunow, M., Bloemhof, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. A. J. (2017). Logistics network design for perishable products with heterogeneous quality decay. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 535–549. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.049>

Departamento Nacional de Planeación. (2016). Pérdida y Desperdicio de alimentos en Colombia. In *Departamento Nacional de Planeación*. https://mrv.dnp.gov.co/Documentos/Interes/Perdida_y_Desperdicio_de_Alimentos_en_colombia.pdf

Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Encuesta Nacional Logística 2018*. <https://onl.dnp.gov.co/es/Publicaciones/Paginas/Encuesta-Nacional-Logística-2018.aspx>

Departamento Nacional de Planeación. (2019). *Guía metodológica para el diseño de Planes Logísticos Regionales o Departamentales*.

Departamento Nacional de Planeación. (2020a). *CONPES 3982. Política Nacional Logística* (p. 109). <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/3982.pdf>

Departamento Nacional de Planeación. (2020b). *TerriData :: DNP*. <https://terridata.dnp.gov.co/>

Diabat, A., & Richard, J. P. P. (2015). An integrated supply chain problem: A nested lagrangian relaxation approach. *Annals of Operations Research*, 229(1), 303–323. <https://doi.org/10.1007/s10479-015-1818-4>

Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers and Industrial Engineering*, 57(4), 1472–1483. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.05.009>

ENSIN. (2010). *Encuesta Nacional de la Situación Nutricional en Colombia - 2010* (Issue 26). <https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/resumenfi.pdf>

Eriksson, M., Strid, I., & Hansson, P. A. (2014). Waste of organic and conventional meat and dairy products - A case study from Swedish retail. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.011>

Eskandari-Khanghahi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Taleizadeh, A. A., & Amin, S. H. (2018). Designing and optimizing a sustainable supply chain network for a blood platelet bank under uncertainty. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 71(November 2017), 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.03.004>

FAO. (2013). Food wastage footprint. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. www.fao.org/publications

Farahani, R. Z., Rashidi Bajgan, H., Fahimnia, B., & Kaviani, M. (2015). Location-inventory problem in supply chains: A modelling review. *International Journal of Production Research*, 53(12), 3769–3788. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.988889>

- Ferrer, J. C., Mac Cawley, A., Maturana, S., Toloza, S., & Vera, J. (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations. *International Journal of Production Economics*, 112(2), 985–999. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.05.020>
- FINAGRO. (2014). *Perspectiva del sector agropecuario Colombiano*. https://www.finagro.com.co/sites/default/files/2014_09_09_perspectivas_agropecuarias.pdf
- FINAGRO. (2018). *El momento del Agro*. <https://www.finagro.com.co/noticias/el-momento-del-agro>
- Firoozi, Z., Ismail, N., Ariafar, S., Tang, S. H., Ariffin, M. K. A. M., & Memariani, A. (2013). Distribution network design for fixed lifetime perishable products: A model and solution approach. *Journal of Applied Mathematics*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/891409>
- Firoozi, Z., Ismail, N., Ariafar, S., Tang, S. H., Ariffin, M. K. M. A., & Memariani, A. (2014). Effects of Integration on the Cost Reduction in Distribution Network Design for Perishable Products. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/739741>
- Galal, N. M., & El-Kilany, K. S. (2016). Sustainable agri-food supply chain with uncertain demand and lead time. *International Journal of Simulation Modelling*, 15(3), 485–496. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM15\(3\)8.350](https://doi.org/10.2507/IJSIMM15(3)8.350)
- Garcia, D. J., & You, F. (2015). Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 81, 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.03.015>
- Garrone, P., Melacini, M., & Perego, A. (2014). Opening the black box of food waste reduction. *Food Policy*, 46, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.03.014>
- Ge, H., Goetz, S., Canning, P., & Perez, A. (2018). Optimal locations of fresh produce aggregation facilities in the United States with scale economies. *International Journal of Production Economics*, 197(January), 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.01.007>
- Gebresenbet, G., & Bosona, T. (2012). Logistics and supply chains in agriculture and food. In *Pathways to supply chain excellence*. IntechOpen.
- Ghezavati, V. R., Hooshyar, S., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2017). A Benders' decomposition algorithm for optimizing distribution of perishable products considering postharvest biological behavior in agri-food supply chain: a case study of tomato. *Central European Journal of Operations Research*, 25(1), 29–54. <https://doi.org/10.1007/s10100-015-0418-3>
- Giri, B. C., Jalan, A. K., & Chaudhuri, K. S. (2003). Economic Order Quantity model with Weibull deterioration distribution, shortage and ramp-type demand. *International Journal of Systems Science*, 34(4), 237–243. <https://doi.org/10.1080/0020772131000158500>

- Gobernación del Atlántico. (2016). *Plan de Desarrollo Atlántico Líder*. https://www.atlantico.gov.co/images/stories/plan_desarrollo/plan_de_desarrollo_2016_2016_definitivo.pdf
- Gobernación del Atlántico. (2018). *Priorización de alternativas productivas y diagnóstico del mercado de productos agropecuarios del departamento del atlántico* (pp. 1–130).
- Gobernación del Atlántico. (2020). *¡Atlántico para la Gente! Plan de desarrollo 2020-2023* (p. 476). https://www.atlantico.gov.co/images/stories/plan_desarrollo/PlanDesarrollo_2020-2023-Definitivo-A1.pdf
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). Global food losses and food waste: extent, causes and prevention. *International Congress: Save Food!*, 38. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>
- IGAC. (2016). *La mitad del Atlántico tiene tierras arables aptas para el desarrollo agropecuario*. <http://noticias.igac.gov.co/es/contenido/la-mitad-del-atlantico-tiene-tierras-arables-aptas-para-el-desarrollo-agropecuario>
- Ingram, J. S. I., Wright, H. L., Foster, L., Aldred, T., Barling, D., Benton, T. G., Berryman, P. M., Bestwick, C. S., Bows-Larkin, A., Brocklehurst, T. F., Buttriss, J., Casey, J., Collins, H., Crossley, D. S., Dolan, C. S., Dowler, E., Edwards, R., Finney, K. J., Fitzpatrick, J. L., ... Sutherland, W. J. (2013). Priority research questions for the UK food system. *Food Security*, 5(5), 617–636. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0294-4>
- Jedermann, R., Nicometo, M., Uysal, I., & Lang, W. (2014). Reducing food losses by intelligent food logistics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2017). <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0302>
- Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P., & Kechagias, E. P. (2020). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification. *Operational Research*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00600-7>
- Labuza, T. P. (1982). Shelf-life dating of foods. In *Shelf-life dating of foods*. Food & Nutrition Press, Inc. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19820482746>
- Lemaire, A., & Limbourg, S. (2019). How can food loss and waste management achieve sustainable development goals? *Journal of Cleaner Production*, 234, 1221–1234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.226>
- Lipinski, B., Hanson, C., Lomax, J., Kitinoja, L., Waite, R., & Searchinger, T. (2016). Reducing food loss and waste. *Science*, 352(6284), 424–426. <https://doi.org/10.1126/science.352.6284.424-p>
- Long, Q., & Zhang, W. (2014). An integrated framework for agent based inventory-production-transportation modeling and distributed simulation of supply chains. *Information Sciences*, 277, 567–581. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.147>

- Lucas, M. T., & Chhajer, D. (2004). Applications of location analysis in agriculture: A survey. *Journal of the Operational Research Society*, 55(6), 561–578. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601731>
- Manso, M. C., Oliveira, F. A. R., Oliveira, J. C., & Frias, J. M. (2001). Modelling ascorbic acid thermal degradation and browning in orange juice under aerobic conditions. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(3), 303–312. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.t01-1-00460.x>
- Márquez, L., & Cantillo, V. (2013). Evaluating strategic freight transport corridors including external costs. *Transportation Planning and Technology*, 36(6), 529–546. <https://doi.org/10.1080/03081060.2013.830892>
- Mena, C., Terry, L. A., Williams, A., & Ellram, L. (2014). Causes of waste across multi-tier supply networks: Cases in the UK food sector. *International Journal of Production Economics*, 152, 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.03.012>
- Meng, Q., Huang, Y., & Cheu, R. L. (2009). Competitive facility location on decentralized supply chains. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 487–499. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.03.030>
- Mercier, S., Villeneuve, S., Mondor, M., & Uysal, I. (2017). Time–Temperature Management Along the Food Cold Chain: A Review of Recent Developments. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(4), 647–667. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12269>
- MINAGRICULTURA. (2019a). *AgroNet*. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4#collapse4>
- MINAGRICULTURA. (2019b). Plan Integral de Desarrollo Agropecuario y Rural con enfoque territorial. In *Ministerio de agricultura*. <https://www.adr.gov.co/servicios/pidaret/ATLANTICO TOMO II.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, & Universidad Sergio Arboleda. (2018). *Evaluaciones Agropecuarias del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural*. <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>
- Ministerio de Salud. (2015). *RESUMEN EJECUTIVO Primeros resultados de la Encuesta Nacional de la Situación Nutricional en Colombia ENSIN - 2015*. 64. <http://www.ensin.gov.co/Documents/Resumen-ejecutivo-ENSIN-2015.pdf>
- MINTRANSPORTE. (2019). *Apuestas del Gobierno Nacional para mejorar el desempeño logístico* (pp. 1–25). <https://onl.dnp.gov.co/es/Publicaciones/Documents/Presentación Ministerio de Transporte.pdf>
- Mirzaei, S., & Seifi, A. (2015). Considering lost sale in inventory routing problems for perishable goods. *Computers and Industrial Engineering*, 87, 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.05.010>
- Mogale, D. G., Cheikhrouhou, N., & Tiwari, M. K. (2019). Modelling of sustainable food grain supply chain distribution system: a bi-objective approach. *International Journal*

- of Production Research*, 0(0), 1–24. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1669840>
- Nordmark, I., Ljungberg, D., Gebresenbet, G., Bosona, T., & Jürjado, R. (2012). Integrated Logistics Network for the Supply Chain of Locally Produced Food, Part II: Assessment of E-Trade, Economic Benefit and Environmental Impact. *Journal of Service Science and Management*, 05(03), 249–262. <https://doi.org/10.4236/jssm.2012.53030>
- Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2009). Influence of Storage Temperature on the Kinetics of the Changes in Anthocyanins, Vitamin C, and Antioxidant Capacity in Fresh-Cut Strawberries Stored under High-Oxygen Atmospheres. *Journal of Food Science*, 74(2), C184–C191. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01075.x>
- Oms-Oliu, G., Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2009). Use of Weibull distribution for describing kinetics of antioxidant potential changes in fresh-cut watermelon. *Journal of Food Engineering*, 95(1), 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.04.016>
- Orjuela-Castro, J. A., Sanabria-Coronado, L. A., & Peralta-Lozano, A. M. (2017). Coupling facility location models in the supply chain of perishable fruits. *Research in Transportation Business and Management*, 24(November 2016), 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.08.002>
- Osvald, A., & Stirn, L. Z. (2008). A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food. *Journal of Food Engineering*, 85(2), 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.008>
- Pahl, J., & Voß, S. (2014). Integrating deterioration and lifetime constraints in production and supply chain planning: A survey. *European Journal of Operational Research*, 238(3), 654–674. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.060>
- Pal, A. K., Bhunia, A. K., & Mukherjee, R. N. (2006). Optimal lot size model for deteriorating items with demand rate dependent on displayed stock level (DSL) and partial backordering. *European Journal of Operational Research*, 175(2), 977–991. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.022>
- Pal, S., Mahapatra, G. S., & Samanta, G. P. (2014). An EPQ model of ramp type demand with Weibull deterioration under inflation and finite horizon in crisp and fuzzy environment. *International Journal of Production Economics*, 156, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.05.007>
- Parfitt, J., Barthel, M., & MacNaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 3065–3081. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126>
- Paternina Arboleda, C. (2013). Competencias logísticas para aprovechar los TLC. *Innovación*, 13. <https://www.uninorte.edu.co/documents/57013/0/LogPort.pdf>
- Peleg, M., Engel, R., Gonzalez-Martinez, C., & Corradini, M. G. (2002). Non-Arrhenius and non-WLF kinetics in food systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,

82(12), 1346–1355. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1175>

- Priefer, C., Jörissen, J., & Bräutigam, K. R. (2016). Food waste prevention in Europe - A cause-driven approach to identify the most relevant leverage points for action. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.004>
- Programa Especial para la Seguridad Alimentaria - PESA - Centroamérica. (2011). *Seguridad Alimentaria y Nutricional Conceptos Básicos*. <http://www.fao.org/3/at772s.pdf>
- Qin, Y., Wang, J., & Wei, C. (2014). Joint pricing and inventory control for fresh produce and foods with quality and physical quantity deteriorating simultaneously. *International Journal of Production Economics*, 152, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.01.005>
- Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S. H. R., & Naderi, B. (2018). Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty: Lagrangian relaxation algorithm. *Computers and Chemical Engineering*, 109, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.10.013>
- Ranieri, L., Digiesi, S., Silvestri, B., & Roccotelli, M. (2018). A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su10030782>
- Rapolu, C. N., & Kandpal, D. H. (2020). Joint pricing, advertisement, preservation technology investment and inventory policies for non-instantaneous deteriorating items under trade credit. *Opsearch*, 57(2), 274–300. <https://doi.org/10.1007/s12597-019-00427-7>
- Rohmer, S. U. K., Claassen, G. D. H., & Laporte, G. (2019). A two-echelon inventory routing problem for perishable products. *Computers and Operations Research*, 107, 156–172. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.03.015>
- Romero Álvarez, Y. (2011). Incidencia del PIB agropecuario en el PIB nacional: Evolución y transformación. *Journal of Economic Literature*, 8(2), 49–60.
- Rong, A., Akkerman, R., & Grunow, M. (2011). An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.11.026>
- Salin, V. (1998). Information technology in agri-food supply chains. *International Food and Agribusiness Management Review*, 1(3), 329–334. <https://ageconsearch.umn.edu/record/34523/files/01030329.pdf>
- Samper, B., Manjarrez, L., Álvarez, M., Gómez, L., Forero, Y., Correa, J., Estrada, A., & De Ossa, G. (2005). Encuesta Nacional de la situación nutricional en Colombia ENSIN 2005. *Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. República de Colombia*, 65–66.
- Sanni, S. S., & Chukwu, W. I. E. (2013). An Economic order quantity model for Items with

- Three-parameter Weibull distribution Deterioration, Ramp-type Demand and Shortages. *Applied Mathematical Modelling*, 37(23), 9698–9706. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.05.017>
- Savadkoohi, E., Mousazadeh, M., & Torabi, S. A. (2018). A possibilistic location-inventory model for multi-period perishable pharmaceutical supply chain network design. *Chemical Engineering Research and Design*, 138, 490–505. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.09.008>
- Shahabi, M., Unnikrishnan, A., Jafari-Shirazi, E., & Boyles, S. D. (2014). A three level location-inventory problem with correlated demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 69, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.07.005>
- Shen, Z., Dessouky, M., & Ordonez, F. (2011). Perishable inventory management system with a minimum volume constraint. *Journal of the Operational Research Society*, 62(12), 2063–2082. <https://doi.org/10.1057/jors.2010.181>
- Singh, Z., Singh, R. K., Sane, V. A., & Nath, P. (2013). Mango - Postharvest Biology and Biotechnology. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 32(4), 217–236. <https://doi.org/10.1080/07352689.2012.743399>
- Skouri, K., Konstantaras, I., Papachristos, S., & Ganas, I. (2009). Inventory models with ramp type demand rate, partial backlogging and Weibull deterioration rate. *European Journal of Operational Research*, 192(1), 79–92. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.003>
- Snyder, L. V., Daskin, M. S., & Teo, C. P. (2007). The stochastic location model with risk pooling. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1221–1238. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.076>
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Van Der Vorst, J. G. A. J. (2014). Modelling food logistics networks with emission considerations: The case of an international beef supply chain. *International Journal of Production Economics*, 152, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.012>
- Tsao, Y.-C. (2013). Designing a Fresh Food Supply Chain Network: An Application of Nonlinear Programming. *Journal of Applied Mathematics*, 2013, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/506531>
- Van Der Vorst, J. G. A. J., Tromp, S. O., & Van Der Zee, D. J. (2009). Simulation modelling for food supply chain redesign; Integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research*, 47(23), 6611–6631. <https://doi.org/10.1080/00207540802356747>
- Wu, K. (2001). An EOQ inventory model for items with Weibull distribution deterioration , ramp type demand rate and partial backlogging. *Production Planning & Control*, 12(8), 787–793. <https://doi.org/10.1080/0953728011005181>
- Wu, T., Shen, H., & Zhu, C. (2015). A multi-period location model with transportation economies-of-scale and perishable inventory. *International Journal of Production Economics*, 169, 343–349. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.08.018>

- Wu, W., Cronjé, P., Verboven, P., & Defraeye, T. (2019). Unveiling how ventilated packaging design and cold chain scenarios affect the cooling kinetics and fruit quality for each single citrus fruit in an entire pallet. *Food Packaging and Shelf Life*, 21(January), 100369. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100369>
- Wunderlich, S. M., & Martinez, N. M. (2018). Conserving natural resources through food loss reduction: Production and consumption stages of the food supply chain. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(4), 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.06.002>
- Yu, M., & Nagurney, A. (2013). Competitive food supply chain networks with application to fresh produce. *European Journal of Operational Research*, 224(2), 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.033>
- Zahiri, B., Jula, P., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2018). Design of a pharmaceutical supply chain network under uncertainty considering perishability and substitutability of products. *Information Sciences*, 423, 257–283. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.09.046>
- Zanoni, S., & Zavanella, L. (2012). Chilled or frozen? Decision strategies for sustainable food supply chains. *International Journal of Production Economics*, 140(2), 731–736. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.04.028>
- Zheng, H., & Lu, H. (2011). Use of kinetic, Weibull and PLSR models to predict the retention of ascorbic acid, total phenols and antioxidant activity during storage of pasteurized pineapple juice. *LWT - Food Science and Technology*, 44(5), 1273–1281. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.12.023>